

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELÉCTRICA



**“ENERGÍA SOLAR TÉRMICA PARA GENERACIÓN DE
ELECTRICIDAD EN EL ECUADOR”**

Tesis previa a la obtención del Título de
Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Darwin Diego Cañar Reinoso

DIRECTOR:

Ing. Juan Leonardo Espinoza Abad Ph.D.

Cuenca - Ecuador

2014

RESUMEN

El objetivo general de esta tesis es determinar si la energía solar térmica es aplicable en el campo de la generación de electricidad en el Ecuador mediante el análisis del recurso solar, del impacto ambiental y de las características económicas y técnicas, tomando en cuenta los criterios de cálculo, diseño y operación de una planta solar térmica determinada.

Con la ayuda del Atlas Solar del Ecuador se definen potenciales zonas con radiación solar suficiente que proporcionarían las condiciones para un posible proyecto termo solar a ser implementado en un determinado lugar con el fin de generar electricidad. Una vez definido el sitio, la tesis considera el planteamiento de las características técnicas, económicas y ambientales adecuadas para la implementación de una central solar térmica, en base al análisis del estado del arte de las diferentes tecnologías existentes. Se exponen las características de la tecnología seleccionada para así detallar los criterios de cálculo, diseño y operación a tener en cuenta en la implementación de este tipo de plantas y se lleva a cabo una valoración económica y técnica de la posible implementación de una central solar térmica para generación eléctrica en el Ecuador.

Considerando la cantidad de recurso solar en una zona específica del Ecuador, que cuente con potencial adecuado para su explotación, a manera de ejemplo de cálculo y diseño, se determina la capacidad de generación eléctrica con la que se podría contar en una planta termo solar. Finalmente, se extiende la aplicabilidad de dicha alternativa con una propuesta de optimización basada en la hibridación de la generación solar térmica con generación basada en gas natural o biomasa. De esta manera se puede determinar, de modo preliminar, si la energía solar térmica es aplicable en el campo de la generación de electricidad en el Ecuador.

PALABRAS CLAVE

Energía solar térmica, concentradores solares, planta solar termoeléctrica, hibridación, energías renovables, Ecuador.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is to determine if solar thermal energy is applicable in the field of electricity generation in Ecuador through the analysis of the solar resource, environmental impact and the technical and economic characteristics, taking into account the criteria of calculation, design and operation of a particular thermal solar plant.

With the help of the Solar Atlas of Ecuador, potential areas with sufficient solar radiation are defined that would provide conditions for implementing a solar thermal project in a particular place in order to generate electricity. Once defined the site, the thesis considers the approach of the suitable technical, economic and environmental characteristics for the implementation of a solar thermal power plant, based on the analysis of the state of the art of the different existing technologies. The features of the selected technology are exposed in order to detail the calculation, design and operation criteria to take into account during the implementation of this kind of plants. An economic and technical assessment of the possible implementation of a solar thermal power plant to generate electricity in the Ecuador is also carried out.

Considering the amount of solar resource in a specific area in Ecuador that has the available potential for exploitation, as an example of calculation and design, it is determined the capacity of power generation that could count on a solar thermal power plant. Finally, the applicability of such an alternative with a proposal for optimization based on the hybridization of the solar thermal generation with natural gas or biomass based generation is presented. In this way it can be determined, in an initial way, if solar energy is applicable in the field of electricity generation in Ecuador.

KEYWORDS

Solar thermal energy, solar concentrators, solar thermoelectric plant, hybridization, renewable energy, Ecuador.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	9
1. INTRODUCCION	13
1.1 ANTECEDENTES, ALCANCE, JUSTIFICACIÓN Y METODOLOGIA	13
1.1.1 Antecedentes	13
1.1.2 Alcance	13
1.1.3 Justificación	14
1.1.4 Metodología	14
1.2 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.2.1 Objetivo General	14
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES	15
1.4 ENERGÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES	16
1.4.1 Tecnología y Aplicaciones de la Energía Solar	17
1.5 MATRIZ ENERGÉTICA EN EL ECUADOR	19
1.5.1 Importancia Macroeconómica	19
1.5.2 Actualidad Energética del Ecuador	20
1.5.3 El cambio de la Matriz Energética y Productiva	22
2. EL RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR Y POTENCIALES ZONAS DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR TERMICA	25
2.1 EL RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR: ATLAS SOLAR	25
2.2 POTENCIALES ZONAS DE APROVECHAMIENTO	26
2.2.1 Aspectos a considerar en las zonas de aprovechamiento del recurso solar	29
2.3 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	30
2.4 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO A BAJA Y MEDIA TEMPERATURA	31
2.4.1 Arquitectura solar	31
2.4.2 Colector solar	32
2.5 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO A ALTA TEMPERATURA	34
2.6 APLICACIONES EN EL ECUADOR DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA	36

3. ENERGIA SOLAR TERMICA: CONCENTRADORES SOLARES TERMICOS Y PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA. SELECCION DE LA OPCION TECNOLÓGICA.	39
3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN CONCENTRADOR SOLAR TÉRMICO	39
3.2 TIPOS DE CONCENTRADORES SOLARES TÉRMICOS: CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS Y CONSTRUCTIVAS.....	40
3.2.1 Sistemas cilindro parabólicos	40
3.2.2 Concentradores lineales tipo Fresnel.....	40
3.2.3 Sistemas de receptor central	41
3.2.4 Discos parabólicos.....	41
3.3 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON CONCENTRADORES SOLARES TÉRMICOS	42
3.4 PARTES PRINCIPALES DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA.....	42
3.5 TIPOS DE CENTRALES SOLARES TÉRMICAS.....	44
3.5.1 Central Termo-Solar con Colectores Cilindro-Parabólicos.....	44
3.5.2 Central Termo-Solar con Colectores Fresnel.....	45
3.5.3 Central Termo-Solar de concentración en Torre.....	45
3.5.4 Central Termo-Solar con Discos Parabólicos	46
3.6 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA...	47
3.7 SELECCIÓN DE LA OPCIÓN TECNOLÓGICA PARA ECUADOR	49
4. CRITERIOS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNA CENTRAL SOLAR TERMICA CON TECNOLOGIA COLECTOR CILINDRO-PARABOLICO – CCP.	52
4.1 DISEÑO DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGIA CCP.	52
4.1.1 Parámetros y condiciones de diseño de centrales solares térmicas con tecnología CCP	53
4.1.2 Dimensionamiento de los componentes del campo de CCP (Bloque Solar)	55
4.1.3 Dimensionamiento del bloque de potencia	57
4.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGIA CCP.....	61
4.3 PRINCIPIOS DE CONTROL DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGIA CCP.....	64
4.4 PRINCIPIOS DE MANTENIMIENTO DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGIA CCP.....	66

4.5 ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE UNA PLANTA CCP	67
5. VIABILIDAD TECNICA, AMBIENTAL Y ECONOMICA PARA LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP EN EL ECUADOR.	71
5.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.....	71
5.2 LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP Y SUS IMPACTOS SOCIO-AMBIENTALES	72
5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP	73
5.4 APLICABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP EN EL ECUADOR.....	77
5.5 ELECCION ADECUADA DE UN EMPLAZAMIENTO PARA LA INSTALACION DE UNA PLANTA CCP	78
5.5.1 Análisis de los principales factores para la instalación de una planta CCP	79
5.6 OPTIMIZACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP: DESCRIPCION DE UNA PLANTA HÍBRIDA SOLAR TERMICA	84
5.6.1 Central solar térmica tipo CCP hibrida.....	84
5.6.2 Hibridación con Biomasa	85
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
6.1 CONCLUSIONES	88
6.2 RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	91

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tipos de fuentes energía.....	16
Figura 1.2 Planta solar-termoeléctrica Gemasolar	17
Figura 1.3 Esquema de una torre solar que funciona con aire convectivo	18
Figura 1.4 Imagen del prototipo Helios, avión no tripulado de la NASA propulsado mediante energía solar fotovoltaica	19
Figura 1.5 Cubierta fotovoltaica en el Estadio Nacional de Kaohsiung, sede de los World Games 2009 en Taiwán	19
Figura 1.6 Consumo Energético.....	21
Figura 1.7 Producción de energía por tipo de central (GWh)	22
Figura 2.1 Mapa de Insolación Global Anual Promedio	28
Figura 2.2 Histograma de Frecuencia de la Insolación Global Anual Promedio.....	29
Figura 2.3 Vivienda para aprovechar la luz solar	32
Figura 2.4 Colector plano	33
Figura 2.5 Tubos de vacío.....	33
Figura 2.6 Colectores solares de concentración en la Plataforma Solar de Almería.....	34
Figura 2.7 Esquema de una Central Eléctrica Solar con Heliostatos	34
Figura 2.8 Esquema de una Central Eléctrica Solar con Heliostatos	35
Figura 2.9 Heliostato	35
Figura 2.10 Plataforma Solar de Almería, con las centrales DCS (colectores cilíndricos-parabólicos) y CRS (tipo torre central), al fondo la CESA-1, también de torre central	36
Figura 2.11 Torre central de la CESA-1 y plano parcial del campo de heliostatos	36
Figura 2.12 Sistema para calentamiento de agua de uso residencial	37
Figura 2.13 Vivienda para el cambio climático en el oriente ecuatoriano	38
Figura 3.1 Esquema básico de colector	40
Figura 3.2 Captador cilindro parabólico.....	40
Figura 3.3 Concentrador lineal tipo Fresnel	41
Figura 3.4 Sistema de receptor central	41
Figura 3.5 Discos parabólicos	42
Figura 3.6 Partes principales de una central solar térmica.....	44
Figura 3.7 Parte de las centrales SEGS en California.....	45
Figura 3.8 Central solar Puerto Errado 1 en el sur de España	45
Figura 3.9 Central solar PS10	46
Figura 3.10 Disco solar parabólico	47

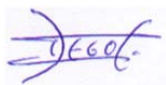
Figura 4.1 Diagrama de las temporadas de la Tierra. Extremo izquierdo: solsticio de verano del hemisferio norte. Delantero derecho: solsticio de verano del hemisferio sur	53
Figura 4.2 Esquema detallado de una central solar térmica con tecnología CCP con dos turbinas (alta y baja presión).....	55
Figura 4.3 Configuraciones en “I” y en “H” para campo de colectores	57
Figura 4.4 Esquema de expansiones en la Turbina de Vapor.....	59
Figura 4.5 Diagrama Temperatura-Entropía del ciclo de Rankine.....	60
Figura 4.6 Central solar térmica con campo de CCP	61
Figura 4.7 Vista de un campo típico de captadores cilindro parabólicos.....	62
Figura 4.8 Tanque de almacenamiento de sales.....	63
Figura 4.9 Esquema básico de un ciclo de Rankine.....	64
Figura 4.10 Radiación de diseño.....	68
Figura 5.1 Planta de Abengoa en Mojave Estados Unidos	71
Figura 5.2 Cinturón Solar Terrestre.....	72
Figura 5.3 Evolución del coste energético de la tecnología solar térmica	75
Figura 5.4 Ubicación de los emplazamientos en el Mapa de radiación del Ecuador	79
Figura 5.5 Ubicación de los emplazamientos en el Mapa de radiación del Azuay	80
Figura 5.6 Líneas de Transmisión/Subtransmisión cercanas a los emplazamientos	81
Figura 5.7 Mapa de riesgo de inundaciones del Azuay.....	81
Figura 5.8 Topografía, ríos, vías y poblados El Descanso	82
Figura 5.9 Topografía, ríos, vías y poblados Pichacay.....	83
Figura 5.10 Esquema de un central ICSS	85
Figura 5.11 Esquema de un central solar híbrida CCP-Biomasa	86
Figura 5.12 Esquema de una caldera de biomasa	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Costos de generación eléctrica a nivel mundial	16
Tabla 1.2 Fuentes de consumo de energía del Ecuador, 2012	20
Tabla 1.3 Ocho proyectos para asegurar la soberanía energética.....	23
Tabla 1.4 Recursos eólicos disponibles	23
 Tabla 2.1 Insolación global promedio anual por provincia.....	 26
Tabla 3.1 Comparación de las características de las Centrales Termosolares [15]	47
Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de las tecnologías Termosolares [15]	48
Tabla 3.3 Referencias de calificación de criterios	50
Tabla 3.4 Matriz de elección de la tecnología adecuada.....	50
 Tabla 4.1 Dimensionamiento del campo de CCP [18].....	 56
Tabla 4.2 Condiciones de operación de la Turbina de vapor	59
Tabla 4.3 Principales características estimadas.....	69
 Tabla 5.1 Periodo de recuperación de la inversión	 76
Tabla 5.2 Niveles de radiación de los emplazamientos.....	80
Tabla 5.3 Referencias de puntuación de los criterios	83
Tabla 5.4 Determinación del emplazamiento más adecuado	83

Yo, Darwin Diego Cañar Reinoso, autor de la tesis “ENERGIA SOLAR TERMICA PARA GENERACION DE ELECTRICIDAD EN EL ECUADOR”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Eléctrico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, Noviembre de 2014



Darwin Diego Cañar Reinoso

0104944301

Yo, Darwin Diego Cañar Reinoso, autor de la tesis “ENERGIA SOLAR TERMICA PARA GENERACION DE ELECTRICIDAD EN EL ECUADOR”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Noviembre de 2014



Darwin Diego Cañar Reinoso

0104944301

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios por sus bendiciones, a mi familia por su apoyo incondicional. A las empresas EMAC y ELECAUSTRO por la información brindada. A mis profesores, especialmente a mi director de tesis Ing. Juan Leonardo Espinoza quien me guio en el desarrollo de la misma.

El Autor

DEDICATORIA

A mi madre por nunca dejarme solo en este propósito de ser profesional e inculcarme los valores de la humildad y sencillez. A mi padre por enseñarme a ser responsable. A mis hermanos que con su ejemplo me inculcaron el valor de la perseverancia.

El Autor

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES, ALCANCE, JUSTIFICACIÓN Y METODOLOGIA

1.1.1 Antecedentes

El incremento de la demanda energética mundial junto con la creciente preocupación por problemas ambientales está llevando a la sociedad a la búsqueda de recursos energéticos renovables no convencionales para satisfacer dicha demanda y tener una mayor diversidad de fuentes para la generación de energía eléctrica.

En la actualidad la protección ambiental es uno de los aspectos principales a considerar en el desarrollo de tecnologías innovadoras, por lo que las fuentes energéticas nuevas deben ser menos contaminantes y económicamente competitivas frente a aquellas basadas en los combustibles fósiles.

En varios países del mundo, el desarrollo de tecnologías para generar electricidad a partir de fuentes de energía renovable ha sido notorio. Tanto en Europa como en Norteamérica se vienen implementando proyectos importantes a partir de la energía eólica, solar, biomasa, geotermia, etc. Respecto a la experiencia con dichas fuentes de energía renovable, el Ecuador actualmente dispone de un contado número de proyectos eólicos, de biocombustibles y solares fotovoltaicos. Sin embargo, salvo el caso de la hidroelectricidad a gran escala, el país no ha planteado un aprovechamiento más agresivo del potencial energético renovable con el que cuenta.

En este sentido, vale destacar que el Ecuador tiene una gran biodiversidad climática, su ubicación geográfica permite contar con diversas fuentes de energía renovable, particularmente la solar, impulsando el desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de energía eléctrica de forma segura y menos contaminante respecto a las alternativas convencionales.

Debido a esta nueva perspectiva, alrededor del mundo se está experimentando el desarrollo de nuevas industrias basadas en la aplicación de las energías renovables para la producción de electricidad como es el caso de la energía solar térmica a alta temperatura, tecnología que será analizada en este estudio para posteriormente plantear su aplicación en el Ecuador.

1.1.2 Alcance

El estudio incluye la determinación de las zonas en el Ecuador que cuentan con potencial de energía solar para un posible aprovechamiento mediante la implementación de una central solar térmica para generación de electricidad.

Una vez definidos los potenciales sitios, la tesis considera el planteamiento de las características técnicas, económicas y ambientales adecuadas para la implementación de una central solar térmica, en base al análisis del estado del arte de las diferentes tecnologías existentes.

Tomando en cuenta lo anterior, mediante un análisis técnico-económico se profundizará en la aplicación de la tecnología de energía solar térmica

seleccionada para generar electricidad en Ecuador, en un sitio específico. Finalmente, se extenderá la aplicabilidad de dicha alternativa con una propuesta de optimización basada en la hibridación de la generación termosolar con generación basada en gas natural o biomasa.

De esta manera se podrá determinar, de modo preliminar, si la energía solar térmica es aplicable en el campo de la generación de electricidad en el Ecuador.

1.1.3 Justificación

La contaminación agresiva que el mundo está produciendo durante más de un siglo y el incremento del calentamiento global debido al uso de los combustibles fósiles (plantas convencionales de generación térmica, vehículos, etc.) contribuyen al deterioro del ambiente y la calidad de vida, a la vez que reducen las reservas energéticas. Frente a lo cual la industria necesita explotar nuevas fuentes de energía que sustituyan a los combustibles fósiles para evitar dicho deterioro, a fin de contribuir al desarrollo sostenible mundial.

Es preciso dar a conocer a la sociedad ecuatoriana las características y beneficios, entre ellos los relacionados a la sostenibilidad energética y ambiental, de la energía solar térmica y las zonas donde se cuenta con un alto potencial de recurso solar para la posible explotación del mismo, a fin de impulsar la implementación de esta alternativa en el campo de la generación de electricidad en el Ecuador.

1.1.4 Metodología

Mediante el análisis tanto de las tecnologías basadas en la energía solar térmica como del recurso solar ecuatoriano se podrá realizar una comparación con los países que van a la vanguardia en el uso de estas tecnologías para generación eléctrica y se podrá determinar si una o varias de ellas son aplicables en el Ecuador.

Con la ayuda del Atlas Solar del Ecuador y de mapas topográficos y de uso del suelo se definirán potenciales zonas con radiación solar suficiente que proporcionarían las condiciones para un posible proyecto termo solar implementado en un determinado lugar con el fin de generar electricidad.

Se expondrán las características de la tecnología seleccionada de generación termo solar para así detallar los criterios de cálculo, diseño y operación a tener en cuenta en la implementación de este tipo de centrales y finalmente se realizará un análisis técnico y económico acerca la viabilidad de la eventual instalación de una innovadora central eléctrica en el Ecuador.

1.2 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.2.1 Objetivo General

Determinar si la energía solar térmica es aplicable en el campo de la generación de electricidad en el Ecuador mediante el análisis del recurso solar, del impacto ambiental y de las características económicas y técnicas tomando en cuenta los criterios de cálculo, diseño y operación de una central termo solar determinada.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el recurso solar ecuatoriano, identificar y seleccionar las zonas con potencial adecuado para su posible explotación y uso en la producción de electricidad mediante concentradores solares térmicos.
- Exponer las tecnologías termo solares existentes en el mundo y las experiencias de su operación.
- Desarrollar criterios de cálculo y diseño de una central solar térmica de acuerdo a las características del recurso solar ecuatoriano y evaluar los impactos operativos, económicos y ambientales de la implementación de una central de este tipo en el Ecuador.
- Considerando la cantidad de recurso solar en una zona específica del Ecuador, que cuente con potencial adecuado para su explotación, a manera de ejemplo de cálculo y diseño, determinar la capacidad de generación eléctrica con la que se podría contar al implementar una planta termo solar.
- Realizar una valoración económica y técnica de la posible implementación de una central termo solar para generación eléctrica en el Ecuador, compararla con parámetros internacionales y determinar su viabilidad.
- Extender la aplicabilidad de la alternativa seleccionada, con una propuesta de optimización basada en la hibridación de generación termo solar con generación basada en gas natural o biomasa.

1.3 ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES

Energía renovable es la energía que se obtiene de fuentes naturales inagotables. Se denomina renovable porque se encuentra en permanente renovación por medios naturales y porque dependen de ciclos cerrados que a su vez dependen de factores externos a la capa terrestre donde se aprovechan las energías renovables. [1]

Entre las fuentes más importantes de energía renovable están las que provienen directamente del sol (eólica, hidráulica, fotovoltaica, biomasa, térmica), la geotermia y aquellas relacionadas con los océanos.

La energía solar o irradiación solar es el motor para el movimiento de las masas de agua y aire, así como el responsable de la vida. Las energías eólica, hidráulica, fotovoltaica, biomasa, térmica, etc. dependen de la energía proveniente del sol.

Por otro lado, la energía geotérmica se obtiene del calentamiento interno de la Tierra. Es la energía que se emite desde el centro del planeta hacia sus capas exteriores.

Los océanos son masas de agua en movimiento que se produce de dos formas. El movimiento total, es decir se mueve como un solo cuerpo de lado a lado, este fenómeno se denomina marea, causada por el acercamiento o distanciamiento de la luna a La Tierra. El aprovechamiento de la energía producida por las mareas se denomina energía mareomotriz.

La energía undimotriz aprovecha el movimiento superficial debido a las corrientes de aire que chocan con el agua de los océanos, el agua se eleva

formando ondas u olas. Por su parte, la energía de gradiente térmico marino o maremotérmica se basa en el calentamiento de la superficie marina debido a la radiación solar y aprovecha la diferencia de temperaturas a diferentes profundidades del mar.

En la Figura 1 se pueden ver los diferentes tipos de energía primaria.



Figura 1.1 Tipos de fuentes energía

Fuente: <http://adnre.blogspot.com/>

1.4 ENERGÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES

La energía solar es una fuente de energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

El calor y la luz del Sol pueden aprovecharse por medio de captadores como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, que pueden transformarla en energía eléctrica o térmica.

Las tecnologías solares se clasifican en pasivas o activas según cómo capturan, convierten y distribuyen la energía solar. Las tecnologías activas incluyen el uso de paneles fotovoltaicos y colectores térmicos. Entre las técnicas pasivas, se encuentran técnicas enmarcadas en la arquitectura bioclimática: la orientación de los edificios al Sol, la selección de materiales con una masa térmica favorable o con propiedades para la dispersión de luz, así como el diseño de espacios mediante ventilación natural. [2]

La fuente de energía solar más desarrollada en la actualidad es la energía solar fotovoltaica. Su coste se ha reducido, aumentando a su vez la eficiencia, y su coste medio de generación eléctrica ya es competitivo con las fuentes de energía convencionales. [27] La energía solar termoeléctrica está reduciendo sus costes también de forma considerable.

Tabla 1.1 Costos de generación eléctrica a nivel mundial

FUENTE	COSTO GENERACION (US\$ centavos/kWh)
Carbón	4 - 5.5
Gas Natural	3 - 4

Gran Hydro	1.8 – 3
Combustóleo	3.9 - 5.3
Nuclear	2.4 - 7.2
Geotermia	4.5 - 8.5
Mini Hydro	5 – 10
Biomasa	4 – 9
Eólico	3 – 8
Fotovoltaico	30 – 80
Solar térmica	12 – 18

Fuente: http://apemec.cl/?page_id=1275



Figura 1.2 Planta solar-termoeléctrica Gemasolar

Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar#mediaviewer/Archivo:Gemasolar.jpg

La planta solar-termoeléctrica Gemasolar (situada en Andalucía, España) tiene 19,9 MW de potencia y puede almacenar energía durante más de 15 horas, lo que permite que pueda proporcionar energía 24 horas al día.

1.4.1 Tecnología y Aplicaciones de la Energía Solar

Clasificación de la energía solar por tecnologías y su correspondiente uso más general: [2]

- **Energía solar-térmica activa:** para uso de baja temperatura (entre 35 °C y 60 °C), se utiliza en casas para producir agua caliente para uso sanitario y calefacción; de media temperatura, alcanza los 300 °C; y de alta temperatura, alcanza los 2000 °C. Esta última, se consigue al incidir los rayos solares en espejos, que van dirigidos a un reflector que lleva a los rayos a un punto concreto. También puede ser por centrales de torre y por espejos parabólicos. Estas tecnologías se describirán con más detalle en el capítulo 3 y son usadas para producir electricidad con un ciclo termodinámico convencional a partir de un fluido calentado a alta temperatura.
- **Energía solar-térmica pasiva:** Aprovecha el calor del sol sin necesidad de sistemas mecánicos, por ejemplo la denominada arquitectura bioclimática.
- **Energía solar fotovoltaica:** Es usada para producir electricidad mediante placas de semiconductores que se alteran con la radiación (luz) solar.
- **Energía solar híbrida:** Combina la energía solar con otra energía. Según la energía con la que se combine es una hibridación:
 - Renovable: biomasa, energía eólica.
 - No renovable: Combustible fósil.

- **Energía eólico solar:** El aprovechamiento de la energía solar se lleva a cabo mediante la convección de aire contenido dentro de una chimenea o torre que en su base contiene aerogeneradores, durante el día esta torre es calentada por el sol, calentándose también el aire de su interior creándose una corriente de aire ascendente dentro de la torre y la succión que esta crea en la base de la torre ventila y enfría el edificio subyacente. [28]

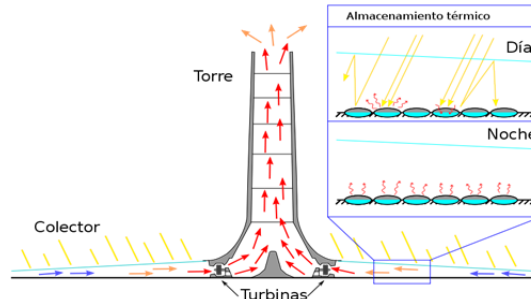


Figura 1.3 Esquema de una torre solar que funciona con aire convectivo

Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Torre_solar#mediaviewer/Archivo:Torresolar2.svg

Entre los ejemplos prácticos de aplicación de la energía solar están:

- **Huerta o granja solar**, son instalaciones fotovoltaicas que generan energía a pequeña escala para venderla a la red eléctrica. En Ecuador, hay ejemplos recientes tales como:
 - El proyecto San Isidro ubicado en el Cantón Arenillas, provincia de El Oro con una capacidad de generación de 650 kW.
 - El proyecto Renoenergy ubicado en el Cantón Zapotillo, provincia de Loja con una capacidad de generación de 700 kW.
- **Centrales térmica solares**, tales como:
 - La que está en funcionamiento desde el año 2007 en Sanlúcar la Mayor (Sevilla), de 11 MW de potencia que entregará un total de 24 GWh al año.
 - La de Llanos de Calahorra, cerca de Guadix, de 50 MW de potencia. En proyecto Andasol I y II.
- Potabilización de agua.
- Cocina solar.
- Destilación.
- Evaporación.
- Fotosíntesis.
- Secado.
- Arquitectura sostenible.
- Cubierta solar (fotovoltaica).
- Movilidad solar (aviones, botes, autos).
- Acondicionamiento y ahorro de energía en edificaciones:
 - Calentamiento de agua.
 - Calefacción doméstica.

- Iluminación.
- Refrigeración.
- Aire acondicionado.
- Energía para pequeños electrodomésticos.



Figura 1.4 Imagen del prototipo Helios, avión no tripulado de la NASA propulsado mediante energía solar fotovoltaica

Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar#mediaviewer/Archivo:Helios_in_flight.jpg



Figura 1.5 Cubierta fotovoltaica en el Estadio Nacional de Kaohsiung, sede de los World Games 2009 en Taiwán

Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar#mediaviewer/Archivo:WorldGame2009_Stadium_completed.jpg

1.5 MATRIZ ENERGÉTICA EN EL ECUADOR

1.5.1 Importancia Macroeconómica

Es necesario analizar la importancia de las energías primarias dentro del marco macroeconómico del país, donde el petróleo representa el 89% de la oferta energética primaria.

En el 2012 el producto interno bruto (PIB) del Ecuador fue de U\$\$ 84.000 millones, de los cuales U\$\$ 9.600 millones le correspondieron al sector petrolero, esto equivale a casi toda la producción de la industria manufacturera de ese año. [3]

El Ecuador es un país exportador de energías primarias, siendo el petróleo su principal rubro de exportación, que en el 2012 representó para el país: el 31% de los ingresos fiscales, el 11% en el PIB, y el 58% del total de sus exportaciones. Por lo que es evidente el impacto que tiene el petróleo en la sostenibilidad del comercio ecuatoriano y de la economía misma del país. [3]

Adicionalmente, en el Ecuador la industria de la Refinación de Hidrocarburos no responde a la demanda nacional lo cual deja un balance negativo que

evidencia una dependencia en la importación de productos. Con la construcción de la Refinería del Pacífico se pretende solucionar este problema y disminuir los gastos de importación de naftas para gasolina, Diesel y otros derivados. [3]

A pesar del impulso dado por el Estado ecuatoriano en los últimos años para incrementar la producción de petróleo y su volumen de refinación, los hidrocarburos son energías primarias no renovables que se agotarán, entonces es necesario establecer estrategias que lleven al país hacia una nueva matriz energética y productiva.

1.5.2 Actualidad Energética del Ecuador

El Ecuador posee casi toda la gama de recursos energéticos primarios, pero ha afrontado hasta hace poco, varias crisis de energía por la falta de inversión y planificación para el desarrollo de fuentes de energía más eficientes y menos contaminantes. [3]

Los sectores de principal demanda interna energética en el país son: [3]

- El sector del transporte que consume 44% de naftas y 43% de diesel oil.
- El sector industrial que consume 39% de diesel oil, 31% de electricidad y 17% de fuel oil.
- El sector residencial que consume 52% de GLP, 25% de electricidad y 23% de leña.

Los requerimientos energéticos en el Ecuador son abastecidos mayoritariamente por hidrocarburos fósiles, los que suplieron en el año 2012 el 79% de la demanda de energía, mientras que el 10% de la energía requerida fue abastecida por electricidad, un 6% de la energía requerida fue cubierta por no energéticos y un 5% fue cubierto por fuentes primarias (leña y productos de caña).

Tabla 1.2 Fuentes de consumo de energía del Ecuador, 2012

FUENTES DE CONSUMO	kBep	%
Electricidad	8.578	10
Hidrocarburos	66.578	79
No Energético	4.865	6
Combustibles Renovables	3.928	5
TOTAL	83.950	100

Fuente: OLADE, 2012

A continuación se puede observar la figura que representa la participación de los sectores en el consumo energético total, es decir, tomando en cuenta electricidad y combustibles.

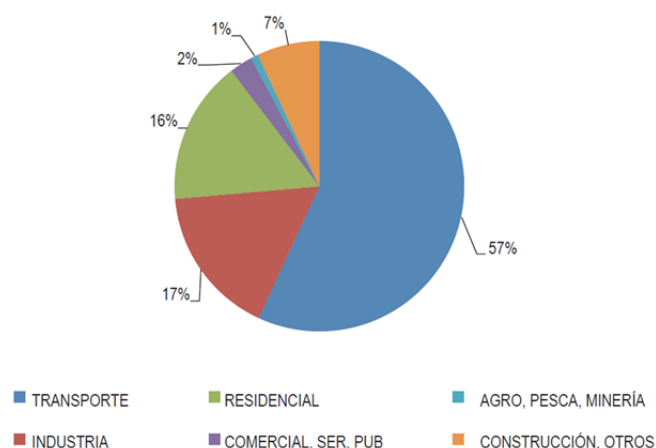


Figura 1.6 Consumo Energético

Fuente: OLADE, 2012

El mayor consumo de energía, se encuentra concentrado en el sector transporte, con un 57% del consumo, seguido del consumo correspondiente al sector industrial con un 17%, el sector residencial tiene una participación del 16%, el comercial con una participación 2%, el sector correspondiente al agro, minería y pesca con una participación del 1% y finalmente el sector de la construcción con un 7%.

El crecimiento de la demanda energética del Ecuador es de 1,9 veces el crecimiento del PIB, debido a que no se ha tenido una política de planificación energética (eficiencia energética), ni un proceso de desarrollo industrial en las últimas décadas. [3] Sin embargo, esta realidad parece estar cambiando en los últimos años.

Por ejemplo, a pesar que la generación de energía eléctrica a través de las centrales hidroeléctricas no abastece las necesidades del país, y para satisfacer la demanda interna se compra a Perú y Colombia o se cubre la demanda a través de termoeléctricas, es digno de mencionar que del año 2007 al 2012 se incrementó en 3011 GWh la generación de electricidad mediante hidroeléctricas y se disminuyó en 1215 GWh la generación de electricidad mediante centrales térmicas. [3] Ello representa un incremento de 3% en generación hidroeléctrica y una reducción de 1% de generación térmica respecto al total de energía eléctrica generada en el país en el año 2012.

En la Figura 1.7 se aprecian los valores de energía bruta en GWh y porcentajes de participación de cada tipo de central disponible en el país.

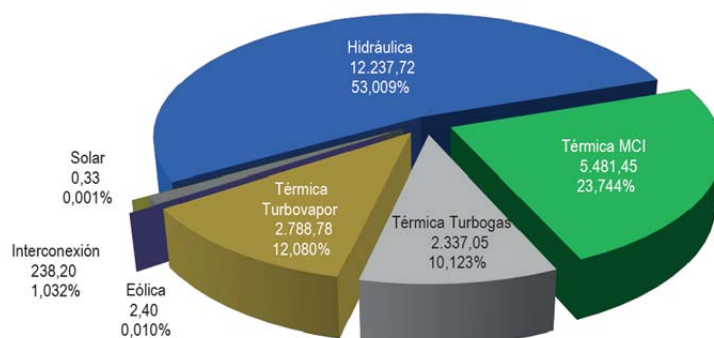


Figura 1.7 Producción de energía por tipo de central (GWh)

Fuente: Estadísticas del CONELEC, 2012

Se prevé que, a partir del año 2016, con el ingreso de las hidroeléctricas se reducirá en un 91% el consumo de combustibles fósiles para generación de electricidad, reduciendo la emisión anual de CO₂ en 7.6 MM Ton. [3] A pesar que hace pocos años Ecuador importaba energía, se estima que a partir del 2016 la potencia efectiva instalada llegue a los 7.600 MW, convirtiéndose en un país exportador de energía de esta manera impulsando la soberanía energética.

1.5.3 El cambio de la Matriz Energética y Productiva

El cambio de la matriz energética y productiva en nuestro país es un desafío, se deben implementar nuevas políticas energéticas de inversión y planificación que permitan el proceso de cambio. Para esto se han planteado los siguientes objetivos a desarrollarse durante el cambio de la matriz energética y productiva: [3] [4]

- Sostenibilidad económica.
- Soberanía energética.
- Eficiencia en el consumo de energía.
- Reducción de demanda energética.
- Articular a la Academia con los procesos de transformación de la matriz energética.

Para el periodo 2013-2017 se están desarrollando proyectos de generación energética mediante fuentes solares, geotérmicas, eólicas e hidroeléctricas, en este último campo destacan ocho grandes proyectos que tendrán una potencia instalada de aproximadamente 3.000 MW.

Tabla 1.3 Ocho proyectos para asegurar la soberanía energética

Proyecto	Ubicación	Presupuesto En millones de dólares	Financiamiento	Producción (Gw/h año)	Potencia (MW)
Coca Codo Sinclair	El Chaco (Napo), Gonzalo Pizarro (Sucumblos)	\$ 2.245'00.000	Recursos fiscales, crédito del Eximbank de China	8.731	1.500
Delsitanisagua	Zamora (Zamora Chinchipe)	\$ 215'000.000	Recursos fiscales, Banco de Desarrollo de China	904	115
Manduriacu	Quito (Pichincha), Cotacachi (Imbabura)	\$ 132'900.000	Recursos fiscales, crédito BNDES	341	60
Mazar Dudas	Azogues (Cañar)	\$ 51'200.000	Recursos fiscales, Banco de Desarrollo de China	125,27	20,82
Minas San San Francisco	Pucará (Azuay), Zaruma y Pasaje (El Oro)	\$ 508'800.000	Recursos fiscales, Banco de Desarrollo de China, se gestiona un crédito con el Eximbank	1,29	270
Quijos	Quijos (Napo)	\$ 115'890.000	Recursos fiscales, Banco de Desarrollo de China	355	50
Sopladora	Sevilla de Oro (Azuay), Santiago de Méndez (Morona Santiago)	\$ 735'190.000	Recursos fiscales, crédito del Eximbank de China	2.800	487
Toachi Pilatón	Mejía (Pichincha), Santo Domingo, Sigchos (Cotopaxi)	\$ 528'000.000	Recursos fiscales, Biess, crédito del Eximbank de China	1.120	253

Fuente: Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022

Por otro lado, debido a la presencia de la cordillera de Los Andes y la cercanía con el Océano Pacífico, el Ecuador cuenta con zonas con un alto potencial eólico para generación de electricidad que al momento se encuentran en fase de estudio.

En la tabla 1.4 se presentan los proyectos con probabilidad de ser implementados a corto plazo ya que se encuentran en avanzado nivel de estudios, concesión, contrato y construcción. Vale indicar que la tabla no considera a los proyectos San Cristobal (2.4 MW) y Villonaco-1 (16.5 MW) ya en operación desde el año 2007 y 2013, respectivamente.

Tabla 1.4 Recursos eólicos disponibles

PROYECTO	CAPACIDAD (MW)
Huascachaca	50,0
Villonaco Fase 2 Ducal - Membrillo)	50,0
Salinas	15,0
García Moreno	15,0
Las Chinchas	10,5
Santa Cruz - Baltra	3,0
Total	143,5

Fuente: Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022

El bagazo de caña se ha usado como combustible para producir energía eléctrica que es aportada al S.N.I. por parte de los ingenios azucareros Ecoelectric, San Carlos y Ecudos; esta se constituye como la principal aplicación de bioenergía en el Ecuador con 101 MW instalados. [29]

En la ciudad de Cuenca, la empresa EMAC EP, en el Relleno de Pichacay, procesará 638 m³/h de biogás producido por la basura recolectada, la energía eléctrica se obtendrá de dos generadores de combustión interna a gas metano para una potencia de 2 MW. [29]

El Ecuador también cuenta con un alto potencial geotérmico, CELEC EP está desarrollando los estudios de pre-factibilidad inicial para la evaluación del potencial geotérmico en las áreas de Tufiño, Chacana, Chachimbiro y Chalupas.

El potencial solar del Ecuador es alto, el nivel de insolación diario constante todo el año y la homogeneidad en su territorio lo convierte en un país donde se puede aprovechar de una manera sostenible este recurso renovable.

En la actualidad la aplicación de sistemas solares fotovoltaicos ha sido la que más se ha desarrollado en el Ecuador, gracias a la asignación de recursos por parte del FERUM, estos sistemas, particularmente a pequeña escala, se han instalado en las provincias de Sucumbíos, Zamora Chinchipe, Morona Santiago y Loja.

También en Galápagos se encuentran en construcción o estudio los siguientes proyectos con energía solar fotovoltaica:

- Proyecto fotovoltaico Puerto Ayora (1,5 MWp)
- Proyecto híbrido isla Isabela, Galápagos (1,1 MWp + 1,32 MW)
- Proyecto fotovoltaico Baltra (0,20 MWp)

Se estima que la contribución de las energías renovables (biomasa, solar, hidráulica, eólica y geotérmica) se multiplicará por diez, este crecimiento dependerá de sus costos, de los impuestos a las energías no renovables y de las políticas energéticas. [29]

Se han dado así los primeros pasos hacia una autonomía energética, con la incorporación de proyectos de energía renovable, la concreción de los mismos depende del interés e incentivo que tenga cada uno de ellos en referencia a la inversión y criterio con el fin de cambiar la matriz energética del Ecuador.

A pesar de estas iniciativas, en el Ecuador aún no se explota el recurso solar adecuadamente, por lo que es importante el conocimiento de sus prestaciones y el uso de nuevas tecnologías. La implementación a mayor escala de proyectos solares fotovoltaicos o térmicos solares le puede permitir al país optimizar sus recursos por la disminución tanto en el consumo de combustibles fósiles para generar electricidad como de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La energía solar térmica es una fuente que puede proporcionar buenas condiciones ambientales y técnicas para el cumplimiento de este propósito. Se cuenta con zonas, por ejemplo en el sur del país, donde se tienen niveles de insolación constante y máximos térmicos adecuados por lo que sería pertinente estudiar la factibilidad de un proyecto basado en sistemas térmicos solares concentrados (CSP, por sus siglas en inglés) para generar electricidad.

CAPÍTULO 2

2. EL RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR Y POTENCIALES ZONAS DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

2.1 EL RECURSO SOLAR EN EL ECUADOR: ATLAS SOLAR

La ubicación geográfica del Ecuador lo convierte en un país rico respecto al recurso solar, debido a que el ángulo de incidencia de la radiación solar es prácticamente perpendicular a la superficie ecuatoriana durante todo el año, lo que no ocurre en otros países del planeta en donde el ángulo de incidencia de la luz solar varía según las estaciones del año.

Esta ventaja comparativa del Ecuador se traduce en la recepción de una constante y mayor cantidad de radiación solar que varía dentro del territorio ecuatoriano debido solamente a condiciones climatológicas y geográficas locales (por ejemplo altura sobre el nivel del mar o presencia de nubosidad).

Los primeros datos de insolación registrados en Ecuador corresponden a los tomados de las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), estos registros tienen información desde 1962 de insolación global ($\text{wh/m}^2/\text{día}$) y heliofanía que es la duración del brillo solar que corresponde a la radiación solar directa (h/día). [1]

Este primer intento por determinar el potencial solar en Ecuador fue limitado por la tecnología de esa época, de las 54 estaciones la mayoría tuvieron discontinuidad en los datos de varios meses. Sin embargo, este primer estudio sugirió a las provincias de Esmeraldas, Guayas, Azuay, El Oro y Zamora Chinchipe como zonas de gran potencial solar. [1]

Al comparar los datos de insolación global con los de heliofanía se tiene una relación directa entre ambas, la determinación de esta relación más la información del mapa de isohelias anuales del INAMHI permitió la elaboración de un mapa referencial sobre insolación en Ecuador. El estudio sugirió como posibles zonas de alta insolación a las provincias de Pichincha, Imbabura, Cañar, Chimborazo, Esmeraldas Manabí, Guayas, Galápagos y el sector de Cariamanga al norte. [1]

Desde agosto del 2008 el Ecuador cuenta con un Atlas de Irradiación Solar desarrollado por la Corporación para la Investigación Energética (CIE) para uso y difusión del Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC. En el Atlas Solar se puede encontrar datos geo referenciados sobre radiación global, difusa y directa en el Ecuador continental, siendo este documento una importante herramienta para desarrollar proyectos de energía solar.

La CIE utilizó el modelo CRS (Climatological Solar Radiation Model), desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory – NREL de los Estados Unidos. La CIE, luego de filtrar los datos del modelo CRS, seleccionó los correspondientes al territorio ecuatoriano, exportándolos a una base de datos compatible con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

El Atlas de Radiación Solar del Ecuador tiene 39 mapas en formato impreso y digital con una resolución de 1 Km^2 además del respectivo software de consulta

y la base de datos correspondiente; tiene información mensual de las radiaciones directa, difusa y global y los promedios anuales en Wh/m²/día. [5]

Tener esta información es un aporte en el momento de implementar procesos productivos tecnológicamente eficientes en sectores como el agrícola e industrial que impliquen el aprovechamiento de energía solar por ejemplo en sistemas de bombeo, molienda de granos, autoconsumo, iluminación, generación de calor, regulación de temperaturas, etc.; todo esto mediante energías limpias y con condiciones de ventaja estratégica para el país por su ubicación geográfica. [6]

2.2 POTENCIALES ZONAS DE APROVECHAMIENTO

Muchas estaciones del INAMHI, referidas en la sección anterior, salieron de servicio con el paso de los años debido a su antigüedad. Entonces se tienen pocos registros de mediciones para los últimos años; esto sumado a la desaparición del INECEL ocasionó que esta información no se haya recopilado y procesado, es así que la única fuente de información sobre insolación solar de los últimos 20 años corresponde a información satelital. [1]

Como se mencionó, esta información se ha recopilado y procesado para obtener datos sobre insolación directa, difusa y global. En base a esta información satelital, Ecuador cuenta con un “Atlas Solar con fines de Generación Eléctrica” que fue desarrollado por la CIE a pedido del CONELEC, constituyendo un avance para la generación de electricidad con una fuente renovable no convencional.

Del Atlas se desprende que los sitios que más radiación promedio tienen en el año son: Galápagos, Manabí (Pedernales), Sto. Domingo, Pichincha (Mindo, Nanegalito), Imbabura (Ibarra), Loja (Zapotillo, Celica, Macará) y Santa Elena (La Libertad). La zona con mayor intensidad de insolación global es la provincia de Loja con un promedio anual de 5.700 Wh/m²/día. En cambio, el promedio de insolación global más bajo se encuentra entre las provincias de Chimborazo y Morona Santiago en los cantones de Guamote y Morona con 3.750 Wh/m²/día. [1]

A nivel país, los meses con menor insolación global son abril, mayo y junio y los de mayor insolación global son septiembre, octubre y noviembre.

En la tabla 2.1 se indica el rango de valores de insolación global promedio de cada una de las provincias. La Figura 2.1 muestra el Mapa de Insolación Global Anual Promedio en el Ecuador y la Figura 2.2 su histograma de frecuencia.

Tabla 2.1 Insolación global promedio anual por provincia

Provincia	Valor Mínimo (Wh/m ² /día)	Valor Máximo (Wh/m ² /día)	Valor Medio (Wh/m ² /día)
Azuay	4050	4800	4425
Bolívar	4800	4950	4875
Cañar	4050	4650	4350
Carchi	3900	4200	4050
Cotopaxi	4800	5250	5025

Chimborazo	3750	4950	4350
El Oro	4200	5100	4650
Esmeraldas	3900	4350	4125
Guayas	4200	4800	4500
Imbabura	4000	5100	4550
Loja	4500	5700	5100
Los Ríos	4650	4650	4650
Manabí	4200	5250	4725
Morona Santiago	3750	4500	4125
Napo	4200	4800	4500
Pastaza	4500	4650	4575
Pichincha	4050	5250	4650
Orellana	4500	4800	4650
Tungurahua	4200	4300	4250
Santa Elena	4500	4350	4425
Santo Domingo	4650	5250	4950
Sucumbíos	4050	4800	4425

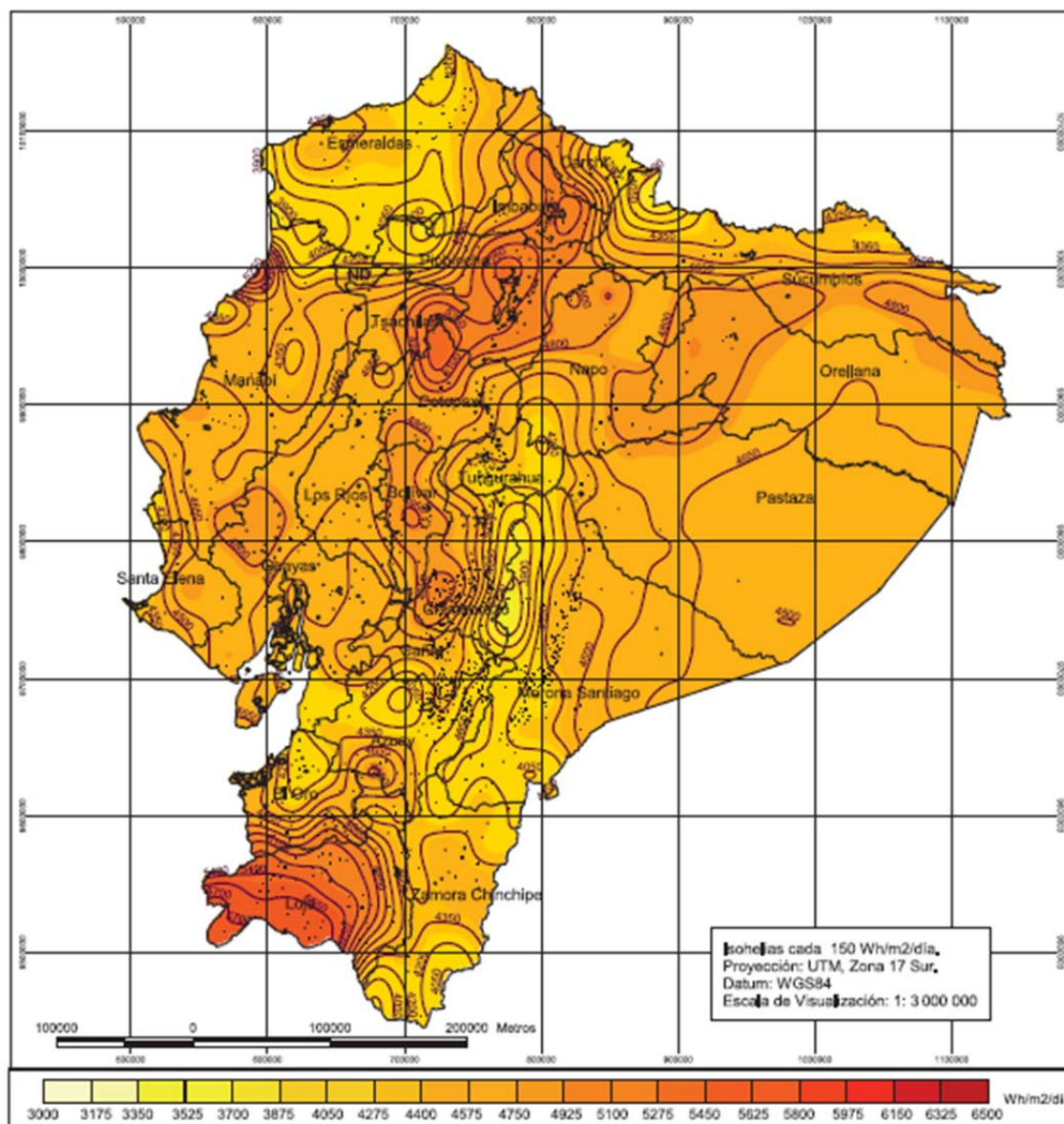
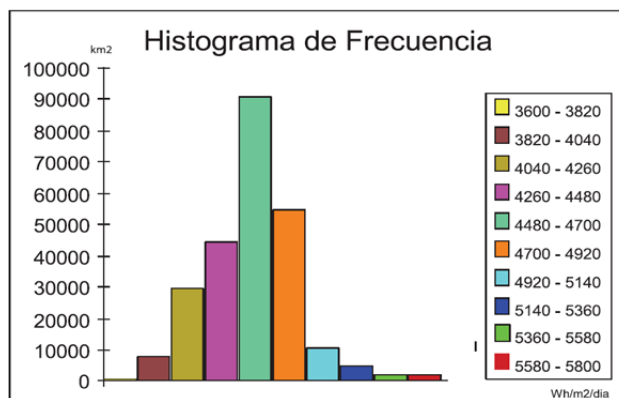


Figura 2.1 Mapa de Insolación Global Anual Promedio

Fuente: Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica



Valor Máximo: 5 748 Wh/m ² /día
Valor Mínimo: 3634 Wh/m ² /día
Valor Promedio: 4574,99 Wh/m ² /día
Desviación Estándar: 301,4093 Wh/m ² /día

Figura 2.2 Histograma de Frecuencia de la Insolación Global Anual Promedio

Fuente: Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica

2.2.1 Aspectos a considerar en las zonas de aprovechamiento del recurso solar

Debido a que el Ecuador está ubicado en la línea ecuatorial, su potencial solar es alto con niveles de insolación solar global promedio del orden de 4,575 kWh/m² - día, un mínimo de 3,634 kWh/m² - día y un máximo de 5,748 kWh/m² - día.

El nivel de insolación diario se mantiene a lo largo de todo el año y la homogeneidad que se presenta en todo el territorio nacional lo hace un país en el cual se puede aprovechar de forma sostenible este recurso renovable.

Para que un proyecto termo solar sea inicialmente factible se requiere el estudio de la radiación existente en determinadas zonas o que se elabore un atlas solar con los niveles de radiación directa, difusa y global durante los diferentes meses del año así como los límites máximos, mínimos y promedios.

El Atlas Solar del Ecuador permite el análisis del nivel de insolación global promedio del territorio ecuatoriano para determinar zonas con recurso solar adecuado para una posible implementación de un proyecto termo solar con el fin de generar electricidad.

Con esas estadísticas se puede determinar las mejores zonas de implantación de sistemas termo solares y se analiza la factibilidad de capacidad disponible para una tecnología determinada, así como la potencia eléctrica que se puede obtener en función del nivel de radiación por metro cuadrado existente en el lugar.

Además de tomar en cuenta el nivel de insolación global promedio existen otros factores que influyen en la determinación de un lugar óptimo para la implementación de un proyecto de este tipo, como por ejemplo:

- Que se cuente el espacio físico suficiente para la construcción del proyecto.
- Normativas locales que permitan la viabilidad del mismo.
- La distancia a los centros de carga no puede ser muy extensa pues se presentarían grandes pérdidas por transmisión lo que significaría la inviabilidad del proyecto.

Se deben tener en cuenta ciertos criterios importantes para tomar una decisión sobre los mejores sitios a ser aprovechados para la generación termosolar a alta temperatura, tales como:

- Menor impacto ambiental posible (sobre espacios naturales, flora, fauna, etc.).

- Meteorología adecuada.
- Buen nivel de radiación solar.
- Suficiente suelo con topografía favorable. Terreno con baja sismicidad.
- Disponibilidad de agua.
- Posibilidades técnicas de evacuación de la energía producida.
- Bajo nivel de humedad ambiente.
- Posibilidad de contratación de terrenos.
- Buenos accesos.

Las vías de comunicación y red eléctrica son factores importantes desde el punto de vista de la eficiencia de las infraestructuras; es decir, se busca utilizar la infraestructura eléctrica y viaria ya existente para disminuir los costes de las instalaciones.

Además de considerar estos criterios, es pertinente para la implementación de un proyecto solar térmico determinar si en la zona este tipo de generación es la más conveniente por aspectos como convivencia con la comunidad, el costo de generación y las condiciones técnicas de operación.

Algunas reglas que siempre se deben tomar en cuenta son:

- En caso de que la zona esté cercana a un centro urbano o poblado, asegurarse de que está a una distancia prudente de zonas pobladas para garantizar la seguridad de los habitantes del lugar.
- Verificar que la extensión de terreno sea lo suficientemente grande para albergar el proyecto, lo que dependerá de la potencia a ser instalada.
- Revisar si los caminos de acceso hasta el emplazamiento son aptos para el tránsito de equipo caminero de gran longitud y alto tonelaje que pudiera requerirse para la construcción del proyecto.

2.3 APLICACIONES DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La radiación solar se origina en el Sol formado por hidrógeno a una temperatura de 20 millones de grados Kelvin, entre los átomos de hidrogeno se producen reacciones de fusión nuclear generándose átomos de helio y una energía equivalente a 64.070 kW por m². [7]

Debido a la distancia de la Tierra al Sol no toda la radiación llega a nosotros, concretamente llega a nuestro planeta unos 1.367 W/m², al atravesar la atmosfera este valor se atenúa disminuyendo su intensidad, según las concentraciones de los gases que componen la atmósfera, características climáticas, latitud del territorio, etc. [7]

Los Sistemas Solares Térmicos aprovechan parte de la energía de dicha radiación para elevar la temperatura de sus colectores solares colocados estratégicamente aprovechando la mayor cantidad posible de esta radiación, luego esta energía se transfiere al líquido portador siendo en la mayoría de los casos agua. [7]

Es decir, este sistema consiste en el calentamiento de un fluido mediante el aprovechamiento de los rayos solares que inciden sobre una superficie por la que pasa dicho fluido.

Aplicaciones de sistemas solares térmicos, sin usar fluido, son el secado solar, hornos solares y cocinas solares.

Los sistemas solares térmicos se clasifican según la temperatura a la que se eleva el fluido calor-transportador: [7]

- **Sistemas de Baja temperatura:**

Abarca los procesos en los que el agua no llega a estado de ebullición; se aplican en la producción de Agua Caliente Sanitaria, para uso doméstico, calentamiento y calefacción de piscinas; se usan tecnologías como colectores planos de caucho o metal en rejilla, serpentín, de capa selectiva, o los sistemas de vacío.

- **Sistemas de Media Temperatura:**

Son las aplicaciones que exigen temperaturas mayores a los 80°C hasta los 250° C; se destinan a procesos industriales, generación de fluidos térmicos, desalinización de agua de mar y refrigeración mediante energía solar.

- **Sistemas de Alta Temperatura:**

Se usan espejos que concentran los rayos del Sol en un colector que contiene un fluido que al llegar a cierta temperatura entra en ebullición, alcanzando presiones elevadas aprovechadas para mover una turbina que produce electricidad. Estos sistemas, que si bien se los menciona en la sección 2.5 de este capítulo, serán abordados a mayor profundidad en el siguiente capítulo.

De lo expuesto, se puede concluir que la energía solar térmica es una oportunidad para el aprovechamiento de la radiación solar, y su desarrollo debe ser promovido por las administraciones públicas de los países debido a su rendimiento y facilidad de instalación.

2.4 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO A BAJA Y MEDIA TEMPERATURA

Son los sistemas que usan directamente la energía del sol para producir agua caliente sanitaria, calefacción, climatización de piscinas, invernaderos, secaderos, etc.

Por el carácter difuso e irregular de la energía solar, al usar sistemas de este tipo es conveniente tener otro sistema convencional de producción de energía para garantizar el suministro, de lo contrario sin radiación solar durante un periodo de tiempo haría imposible la cobertura de las necesidades energéticas de la instalación. [8]

La energía solar a baja temperatura se aprovecha mediante varias vías diferentes, siendo las más importantes la arquitectura solar y los colectores solares.

2.4.1 Arquitectura solar

Conjunto de técnicas dirigidas al aprovechamiento de la energía solar de forma directa, sin transformarla en otro tipo de energía, para su utilización inmediata o para su almacenamiento sin la necesidad de sistemas mecánicos ni aporte externo de energía. [8]

Al diseñarse una vivienda debe constituirse como una etapa fundamental las consideraciones referidas al uso pasivo de la energía solar o arquitectura solar.

Cada vez son más las viviendas construidas que se adaptan al entorno y al clima en el que se encuentran, evitando proyectos irracionales desde el punto de vista energético.

Algunas consideraciones importantes, para países ubicados en el hemisferio norte, son: [8]

- Construir las viviendas con amplios ventanales orientados al sur para caldear el interior en invierno.
- Utilización de persianas diseñadas para originar zonas refrigeradas en el interior durante el verano.
- Paredes construidas con materiales cerámicos que en invierno almacenen el calor y lo disipen en verano.
- Utilización de depósitos de agua para guardar el calor para la noche de invierno.



Figura 2.3 Vivienda para aprovechar la luz solar

Fuente: <http://www.domokyo.com>

Para aquellos países del hemisferio sur, la orientación de ventanales será hacia el norte.

2.4.2 Colector solar

Elemento que absorbe el calor del sol con un mínimo de pérdidas y lo transmite a un fluido (aire o por lo general agua).

Estos sistemas son usados para obtener agua caliente de uso doméstico o para hacer funcionar sistemas de calefacción, se tienen tres tipos: los sistemas de colectores planos, los sistemas de colectores con tubos de vacío y los sistemas de colectores de concentración.

- **Colectores planos**

Son los más difundidos, están compuestos de una placa plana metálica de cobre generalmente pintada de negro, que absorbe eficientemente la radiación solar y la convierte en calor, y de tubos con buen contacto térmico con la placa, por los que circula un líquido refrigerante, por lo general agua o agua con anticongelante, este líquido transmite el calor absorbido por la placa a un sistema de producción de agua caliente o a un sistema de calefacción. [8]

La parte posterior de la lámina tiene aislamiento térmico, y la parte superior una cubierta de plástico, que reduce las pérdidas de calor por radiación y convierte

al colector en una especie de invernadero; una caja metálica es el soporte de todos estos elementos.

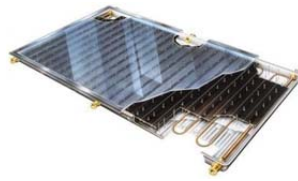


Figura 2.4 Colector plano

Fuente: <http://www.thermosolar.sk>

- **Tubos de vacío**

Aprovechan el vacío creado en su interior para eliminar las pérdidas por convección y aumentar así la temperatura del fluido portador de calor con menos necesidad de superficie de captación efectiva. Estos captadores se utilizan de forma individual, en grupos, en haces o en sistemas de concentración lineal.



Figura 2.5 Tubos de vacío

Fuente: http://oa.upm.es/14011/1/PFC_CARMEN_PAREDES_VELASCO.pdf

- **Colectores de concentración**

La superficie receptora de la radiación solar tiene una forma especial, generalmente parabólica, de esta manera se consigue concentrar la radiación solar en un elemento receptor de superficie muy reducida (un punto, una línea).

Al ser el receptor más pequeño que en los colectores planos, este puede estar fabricado a partir de materiales más sofisticados y caros que permiten una mejor absorción de la energía solar. Por otro lado, al recibir la radiación solar de manera concentrada, estos sistemas proporcionan temperaturas de hasta 300°C (sistemas de media temperatura). Las centrales de colectores de concentración generan vapor a alta temperatura para procesos industriales o para producir energía eléctrica.

Estos sistemas tienen mecanismos de seguimiento que les permite permanecer siempre orientados en la mejor posición para receptor los rayos solares.



Figura 2.6 Colectores solares de concentración en la Plataforma Solar de Almería

Fuente: <http://platea.pntic.mec.es/~jdelucas/centralsolar.htm>

2.5 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO A ALTA TEMPERATURA

El aprovechamiento de la energía solar a alta temperatura para generar electricidad mediante vía termodinámica está basado en principios similares a los que pueden contemplarse en una central eléctrica convencional que quema carbón o petróleo.

Se consigue que la radiación solar caliente a alta temperatura un fluido primario, siendo este el fluido portador de calor que transmite la energía captada es decir el calor a un circuito secundario por el que circula un segundo fluido que luego de transformarse en vapor por acción del calor, acciona una turbina acoplada a un generador. [9]

Estas instalaciones solares en general cuentan con un dispositivo de almacenamiento de energía en forma de calor para en lo posible atenuar las fluctuaciones que puede presentar la radiación solar.

Se tienen varios tipos de centrales solares basadas en este principio: las de una sola caldera, de receptores distribuidos, de discos parabólicos, etc.; sin embargo las más conocidas y extendidas en el mundo son las centrales solares termoeléctricas de receptor central, en las mismas donde la radiación solar incide en un campo de heliostatos. [9]

Dicho campo es una superficie amplia cubierta de grandes espejos conocidos como heliostatos los cuales concentran la radiación solar captada en un receptor. Los sistemas más comunes de este tipo de central cuentan con el receptor instalado en una torre, razón por la cual se conocen como centrales solares de tipo torre central.

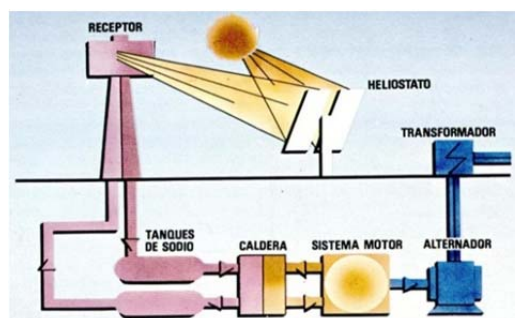
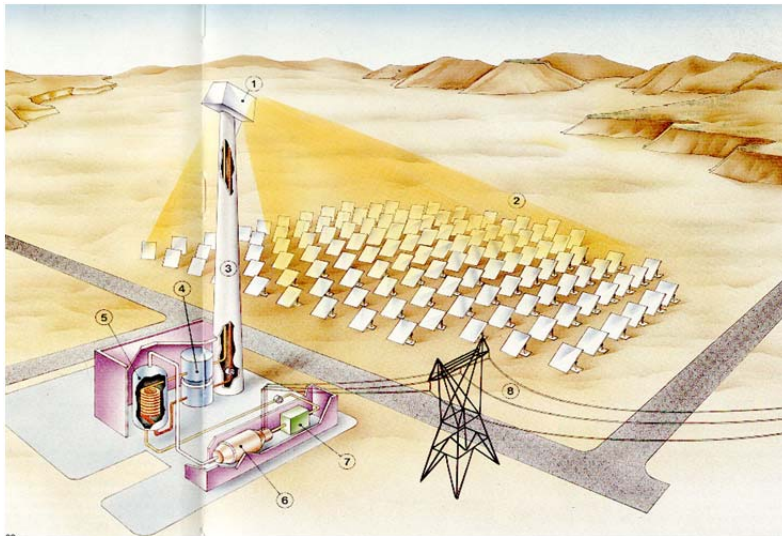


Figura 2.7 Esquema de una Central Eléctrica Solar con Heliostatos

Fuente: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo6.html#3b>



1. Caldera 2. Campo de heliostatos 3. Torre 4. Almacenamiento térmico 5. Generador de vapor 6. Turbo-alternador 7. Aero-condensador 8. Líneas de transporte de energía eléctrica

Figura 2.8 Esquema de una Central Eléctrica Solar con Heliostatos

Fuente: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/solar.html>

Los heliostatos tienen una estructura soporte y una superficie reflectante, también cuentan con mecanismos que permiten que la superficie reflectante se mueva según dos ejes de giro, de manera que pueda captar en cada momento de la mejor manera la radiación solar y concentrarla en el receptor que se encuentra en la torre. El movimiento de los heliostatos se lleva a cabo con medios electrónicos, cada espejo recibe periódicamente las órdenes emitidas por un programa incorporado a un ordenador central. [9]



Figura 2.9 Heliostato

Fuente: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo6.html#3b>

El receptor cuenta con una serie de tubos por los que circula el fluido primario que puede ser agua, sodio, sales fundidas o aire dependiendo de la instalación.

En algunas instalaciones, el propio fluido primario luego de convertirse en vapor por efecto de la radiación solar acciona directamente la turbina sin la necesidad de un fluido secundario. En determinadas centrales el fluido primario transmite la energía previamente al dispositivo de almacenamiento y luego sigue el ciclo termodinámico habitual.



Figura 2.10 Plataforma Solar de Almería, con las centrales DCS (colectores cilíndricos-parabólicos) y CRS (tipo torre central), al fondo la CESA-1, también de torre central

Fuente: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo6.html#3b>



Figura 2.11 Torre central de la CESA-1 y plano parcial del campo de heliostatos

Fuente: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo6.html#3b>

El sistema de torre central y otros sistemas existentes para el aprovechamiento solar térmico a alta temperatura con fines de producción de electricidad, son abordados en detalle en el Capítulo 3.

2.6 APLICACIONES EN EL ECUADOR DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Dado el potencial solar existente y sus condiciones geográficas variadas, en Ecuador se están impulsando proyectos basados en recursos renovables con el propósito de sustituir la explotación de recursos fósiles debido a que afectan la economía del país además de las repercusiones ambientales que producen. Por ejemplo, los proyectos hidroeléctricos Coca Codo Sinclair y Sopladora, los proyectos eólicos Huaschacha y Villonaco y los proyectos fotovoltaicos tanto en Galápagos (Puerto Ayora y Baltra) como en el territorio continental (ya sea conectados a la red o aislados), todos ellos buscan incrementar el aporte de fuentes renovables a la matriz energética del país.

Además de aplicaciones con energía solar para generación de electricidad, en los últimos años se está incursionando en el aprovechamiento de energía solar térmica, de baja temperatura, para calentamiento de agua, principalmente en el sector residencial. En ese sentido, se busca promover políticas que permitan desarrollar la oferta y demanda de calentadores solares de agua y establecer una normativa que garantice que los nuevos proyectos tengan prestaciones para instalar colectores solares que abastezcan la demanda energética para calentamiento de agua en residencias, hoteles e industrias.

Es así que el Ministerio de Energía Renovable y Eficiencia Energética de Ecuador – MEER, tiene como uno de sus proyectos “El aprovechamiento de energía solar térmica para el calentamiento del agua” en viviendas construidas

por el ministerio del ramo (MIDUVI); el objetivo principal de este proyecto es la disminución de los egresos que destina el Estado para la comercialización interna de combustibles (GLP) a partir del aprovechamiento de energía solar térmica para el calentamiento de agua en el sector residencial. [10]

Adicionalmente, en el país existen empresas fabricantes, distribuidores e instaladores de estos sistemas, entre las cuales se pueden mencionar a Tecnova o Electro Ecuatoriana que se encuentran ubicadas en la ciudad de Cuenca.

Un sistema solar térmico para calentamiento de agua para uso doméstico se compone de un colector solar plano (o de tubos de vacío), un tanque de almacenamiento, un sistema de control, las acometidas hidráulicas con los elementos de seguridad y un sistema de apoyo (Ver figura 2.12).

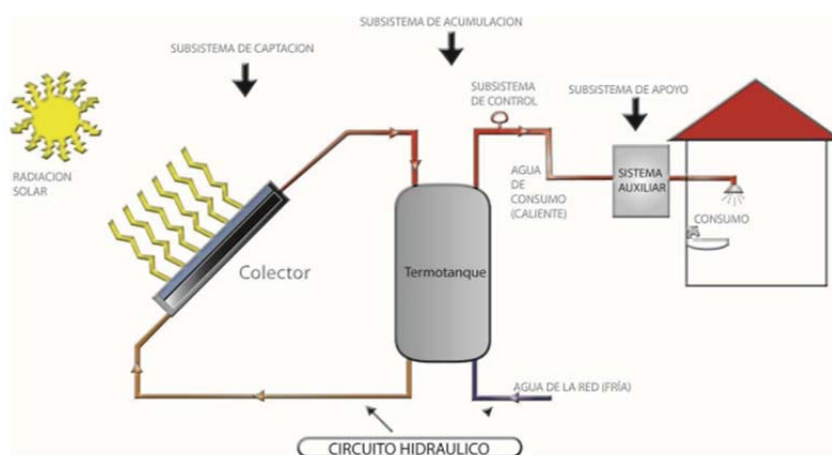


Figura 2.12 Sistema para calentamiento de agua de uso residencial

Fuente: <http://www.cicp-ec.com/pdf/2.%20ENERGIA%20RENOVABLE-1.pdf>

El colector solar capta y transforma la energía radiante del sol en calor que por conducción se transfiere al fluido de trabajo, dicho fluido se mueve entre el colector y el tanque de reserva por diferencia de temperatura de forma natural o forzada. Cuando se consume agua caliente, esta se reemplaza por agua fría de la red que alimenta al tanque termosolar.

Para que un sistema de termosifón opere automáticamente el tanque debe estar por encima de la parte más alta del colector.

Las condiciones de diseño de un sistema solar térmico involucran aspectos como: [11]

- Aprovechar de forma óptima el recurso solar disponible.
- Dimensionarse de acuerdo al consumo requerido de agua caliente.
- Los elementos del sistema deben estar contruidos para asegurar un desempeño eficiente, confiable y seguro durante su vida útil.
- Diseñarse con el fin que la integración de sus partes no necesite de asistencia técnica por largos periodos.
- Diseñarse para soportar la influencia del ambiente local.

- Si al diseñarse el sistema solar térmico se incluye complemento auxiliar de energía es recomendable que cuente con funciones automáticas para que el conjunto opere autónomamente.

En cuanto a la arquitectura solar o bioclimática, el Ecuador también ofrece un amplio campo de acción tanto en zonas cálidas (Costa y Oriente) como en zonas frías (Sierra), lógicamente teniendo en cuenta las particularidades de dichas zonas.

Por ejemplo, en el año 2011 la empresa cuencana de diseño arquitectónico Bojorque-Construcciones desarrolló el diseño de la “vivienda para el cambio climático” en el oriente ecuatoriano, proyecto que tuvo los siguientes objetivos:

- Conseguir que la edificación sea susceptible de enfrentar el cambio climático del planeta.
- Forjar un diseño arquitectónico representativo del delicado ecosistema amazónico.
- Lograr una edificación sustentable que armonice con el hábitat selvático.
- Definir un nuevo concepto urbano que sea compatible con los procesos cooperativos comunitarios nacientes, que se aleje de paradigmas de trazados urbanos neoliberales de consumo y aislamiento.



Figura 2.13 Vivienda para el cambio climático en el oriente ecuatoriano

Fuente: <http://erickbojorque.blogspot.com/2011/09/vivienda-para-el-cambio-climatico.html>

En donde no se ha incursionado aun con fuerza en el Ecuador es en aplicaciones de la energía solar térmica a media y alta temperatura, a pesar de que, como se mencionó anteriormente, existe el potencial para ello. Los siguientes capítulos se enfocan en dichas aplicaciones, y específicamente en aquellas que permiten la generación de electricidad.

CAPÍTULO 3

3. ENERGIA SOLAR TERMICA: CONCENTRADORES SOLARES TERMICOS Y PRODUCCION DE ENERGIA ELECTRICA. SELECCION DE LA OPCION TECNOLOGICA.

3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN CONCENTRADOR SOLAR TÉRMICO

El objetivo de un sistema térmico solar es la captación de la energía que proviene del sol para transformarla y transportarla de la manera más eficaz y económica posible; el aprovechamiento solar puede ser directo, en forma de calor o indirecto usando este calor para obtener trabajo mecánico en un eje y finalmente electricidad. [43]

De las tecnologías existentes se destacan tres por su grado de desarrollo: los sistemas de colectores cilindro parabólicos (CCP), los sistemas de receptor central (SRC) o sistemas de torre central (STC) y los discos parabólicos (DP) o paraboloides del revolución, también se puede mencionar los sistemas de concentradores parabólicos compuestos (CPC) que todavía no están ampliamente desarrollados tecnológicamente. [43]

Los CCP y CPC concentran la radiación solar en un eje, es decir dos dimensiones, en cambio los sistemas de torre y los discos parabólicos lo hacen en un punto, es decir tres dimensiones, de esta manera logrando mayores relaciones de concentración.

La aplicación de los Sistemas Termosolares de Concentración (CSTS, por sus siglas en inglés) para generar electricidad ha alcanzado un grado considerable de desarrollo dando lugar a Centrales Energéticas Termosolares (CETS) que entre los sistemas que aprovechan energías renovables son uno de los de mayor potencial de contribución a la satisfacción de la demanda energética en las regiones que cuentan con alto potencial de recurso solar, además son las más económicas en el campo de la generación de electricidad a partir de energía solar. [43]

Estos sistemas aprovechan la radiación solar directa y en algunos casos la radiación difusa proveniente del sol; el captador solar es el primer elemento que se encuentra la radiación solar en su trayectoria, este absorbe la energía incidente y puede ser entendido como un intercambiador de calor que intercepta la energía radiante del sol para transformarla en energía térmica y transferirla a un fluido que circula en su interior denominado fluido portador de la energía térmica. [43]

Básicamente un captador solar se constituye por un absorbedor que recoge la energía solar, una cubierta transparente y un tubo o tubos por los que circula el fluido termo portador.

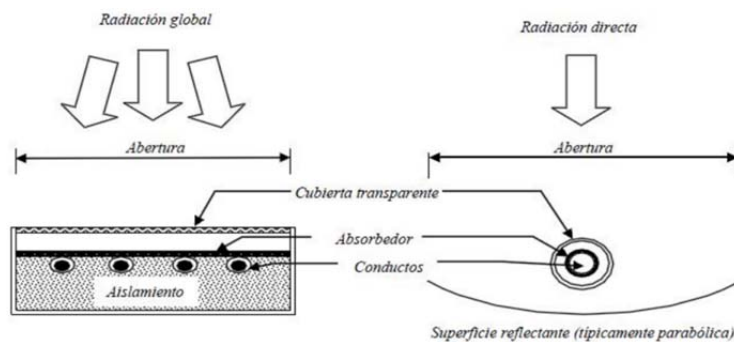


Figura 3.1 Esquema básico de colector

Fuente: http://oa.upm.es/14011/1/PFC_CARMEN_PAREDES_VELASCO.pdf

El elemento más importante del sistema captador es el absorbedor ya que recibe y absorbe primero la radiación solar y la transforma en radiación térmica para que por conducción sea transferida al fluido circulante; en cuanto a la cubierta transparente o semitransparente, esta evita en gran medida la emisión calorífica por convección desde el absorbedor al ambiente, de igual manera lo protege de agentes externos.

3.2 TIPOS DE CONCENTRADORES SOLARES TÉRMICOS: CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS Y CONSTRUCTIVAS

La radiación solar directa es aprovechada a media y alta temperatura a través de sistemas de concentración, esta energía se transfiere a algún proceso posterior mediante un fluido térmico, las principales tecnologías en este campo son:

3.2.1 Sistemas cilindro parabólicos

Estos sistemas usan espejos en forma de canales parabólicos que enfocan la luz solar sobre receptores tubulares de alta eficiencia, por los cuales circula un fluido térmico que generalmente es aceite, este se calienta a temperaturas de hasta 400°C y es bombeado a través de una serie de intercambiadores de calor para producir vapor sobrecalentado que acciona una turbina de vapor y un generador eléctrico convencional para de esta manera producir electricidad mediante un ciclo Rankine. La eficiencia solar-eléctrica de estos sistemas está sobre el 15%. [44]



Figura 3.2 Captador cilindro parabólico

Fuente: <http://www.solarweb.net>

3.2.2 Concentradores lineales tipo Fresnel

Esta tecnología cuenta con un solo eje de seguimiento, a diferencia del captador cilindro parabólico en que el absorbedor se encuentra fijo en el

espacio en la zona focal; se usan reflectores planos simulando espejo curvo por variación del ángulo ajustable de cada fila individual de espejos, en relación con el absorbedor. Constructivamente estos concentradores son sencillos y su costo es bajo; respecto a la eficiencia solar-térmica, esta se encuentra entre 8 a 10%. [44]



Figura 3.3 Concentrador lineal tipo Fresnel

Fuente: [http:// www.solarpaces.org](http://www.solarpaces.org)

3.2.3 Sistemas de receptor central

Estos sistemas se constituyen de captadores solares denominados heliostatos que concentran la radiación solar en punto fijo que se encuentra a cierta altura sobre una torre; al tratarse de un sistema tridimensional se tiene una capacidad de concentración muy elevada alcanzando temperaturas superiores a los 1000°C pudiendo de esta manera integrar un ciclo Brayton operando con aire, sin embargo esta tecnología aún se encuentra en proceso de experimentación y desarrollo. La eficiencia solar-térmica de este sistema es de 23%.

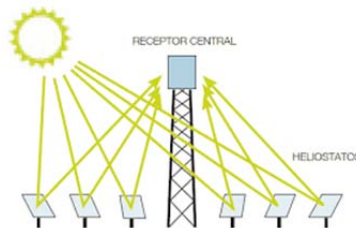


Figura 3.4 Sistema de receptor central

Fuente: <http://www.solarweb.net>

3.2.4 Discos parabólicos

Se conforman de una serie de reflectores formando un paraboloide de revolución que concentran los rayos solares en el foco del paraboloide donde se encuentra el receptor y el conjunto generador. La potencia eléctrica se obtiene mediante la transferencia de potencia térmica de la radiación solar directa concentrada sobre el fluido de trabajo. Se trata de un sistema de alto rendimiento en la actualidad, constituyéndose en la más eficiente de las tecnologías solares con un rendimiento neto de conversión de energía solar a eléctrica que bordea el 25%. [44]



Figura 3.5 Discos parabólicos

Fuente: www.sitiosolar.com

3.3 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON CONCENTRADORES SOLARES TÉRMICOS

Las centrales que utilizan energía termosolar a alta temperatura (concentrated solar power, CSP) aprovechan la energía del sol en plantas a gran escala para generar electricidad. La radiación solar se concentra de forma óptica, de esta manera se alcanzan temperaturas elevadas para el proceso en la central. [14]

Una de las prestaciones más importantes de esta tecnología es que el calor a alta temperatura puede ser almacenado temporalmente, por lo que permite que la producción de electricidad se lleve a cabo según la demanda.

Como se mencionó, el principio básico común a las centrales termosolares es el empleo de sistemas de espejos parabólicos concentradores, que disponen de una gran superficie y que concentran la radiación solar en un receptor. La energía térmica se convierte en electricidad como en las centrales convencionales de turbinas de vapor o gas. Existen dos tipos de sistemas de espejo concentrador, los lineales y los puntuales, y dentro de estos sistemas se tienen cuatro tipos de diseños:

- Sistemas de espejo concentrador lineales: Central cilindro-parabólica y Colectores Fresnel
- Sistema de espejos concentradores puntuales: Torres solares e Instalaciones de disco-Stirling

Las centrales termosolares se destacan debido a que el almacenamiento del calor generado es relativamente sencillo y económico, pudiéndose generar electricidad incluso en las horas donde no se disponga de radiación solar. [14]

Por estas prestaciones este tipo de centrales eléctricas pueden contribuir beneficiosamente en la producción de energía planificada según la demanda, por lo que se espera un futuro energético donde se pueda disponer de varias opciones de generación eléctrica bajo la priorización del uso de energías renovables.

3.4 PARTES PRINCIPALES DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA

Un sistema solar térmico de alta temperatura con concentración, cuenta con los siguientes subsistemas: [16]

- *Subsistema de concentración de energía solar:* este sistema se refiere al reflector que concentra la energía solar para transferirla al receptor o absorbedor.

- *Subsistemas de transformación de radiación solar en energía térmica:* se denominan receptores o absorbedores y facilitan la transformación de la energía radiante en energía interna del fluido de trabajo.
- *Subsistema de almacenamiento de energía térmica:* guarda parte de la energía térmica suministrada por los captadores solares durante las horas de sol, para cederla en aquellos momentos en los que no hay radiación solar directa.
- *Subsistema de conversión de energía térmica en eléctrica:* es donde tiene lugar el aprovechamiento de la energía térmica.
- *Subsistema de control:* obedece a distintas filosofías las cuales se reflejan tanto en grado de automatización como en las funciones que realizan los distintos subsistemas.
- *Subsistema de adquisición de datos:* es importante en las centrales solares térmicas actuales, no solo en cuanto colaboración al control y operación, sino también por las evaluaciones inherentes a sistemas nuevos.

A manera de ejemplo a continuación se citan las partes principales de una central con tecnología de torre central.

Un conjunto de espejos llamados heliostatos, reflejan y concentran la radiación solar en una caldera ubicada en una torre donde se calienta un fluido, generalmente agua, aceite o sales fundidas, que permite la evaporación del agua contenida en las tuberías ubicadas alrededor de la caldera.

Este vapor de agua adquiere mucha presión y es usado para mover una turbina conectada a un generador, con el movimiento de la turbina se genera electricidad que viaja desde el generador hasta los transformadores, cuya función es elevar la tensión para el transporte de esta energía a través de la red eléctrica hasta los centros de consumo. Tras inducir el movimiento de la turbina, el vapor de agua es nuevamente condensado para volver a utilizarse.

Las partes principales de una planta solar térmica de tipo torre central son: [30]

- Heliostatos: son los espejos que reflejan y concentran la radiación solar, pueden cambiar su orientación según el nivel de radiación para el máximo aprovechamiento de la energía solar.
- Caldera: aquí se calienta el fluido que permite la evaporación del agua que produce el movimiento de la turbina.
- Turbinas: hacen girar el generador al recibir la presión del vapor del agua.
- Generador: su función es la producción de electricidad.
- Condensador: condensa el vapor que mueve la turbina para que pueda volver a usarse.
- Tuberías: cuya función es el transporte del vapor de agua.

En la figura 3.6 se presentan las partes principales de una central solar térmica de tipo torre central entre las cuales destacan:

1. Campo de heliostatos
2. Caldera o receptor
3. Torre

4. Generador de vapor
5. Turbo-alternador
6. Aerocondensador



Figura 3.6 Partes principales de una central solar térmica

Fuente: <http://www.educasitio.com>

3.5 TIPOS DE CENTRALES SOLARES TÉRMICAS

3.5.1 Central Termo-Solar con Colectores Cilindro-Parabólicos

Este tipo de central termo-solar posee un rango de potencia entre 50 y 300 MW. Consiste en un semi-cilindro de espejos que concentran los rayos solares sobre una tubería central por la cual circula un fluido que transporta el calor, frecuentemente aceite sintético. Para la acumulación de la energía se utilizan sales fundidas. Sus principales componentes son los espejos, el sistema de conversión de energía, el sistema de enfriamiento y el fluido de trabajo. [33]

Se encuentra en etapa comercial y es la tecnología más madura y común de los CSP disponibles en la actualidad. Permiten ofrecer temperaturas máximas de 400°C, eficiencia solar-térmica de 60% y solar-eléctrica de 15%. El factor de planta puede alcanzar un 40%. Para funcionar se requiere cielos despejados y alta radiación solar. Respecto del requerimiento de agua, éstos necesitan alrededor de 3.000 L/MWh.

Los costos actuales para este tipo de central se encuentran entre 4.000 y 8.000 USD por kW instalado, 4.000 USD/kW sin almacenamiento, y 8.000 USD/kW con almacenamiento, mientras los costos de operación y mantenimiento se estiman en alrededor de 70 a 140 USD/kW al año. El costo medio de la energía es cercano a 18,5 centavos USD/kWh. [31]

Centrales de este tipo están ya instaladas o en construcción en diversas partes del mundo. Las instalaciones construidas más grandes se encuentran operando en Estados Unidos desde la década de 1980 en el desierto de Mojave, las llamadas SEGS (siglas del término en inglés “Solar Electric Generating Station”. Estación solar de generación eléctrica en español). Se trata de 9 centrales de diversos tamaños y potencias que juntas suman un total de 354 MW. En España en Aldeire (Granada) ANDASOL I entro en operación en 2008, en 2009 ANDASOL II y ANDASOL III en 2011 con una capacidad de generación de 50 MW cada una. [32]



Figura 3.7 Parte de las centrales SEGS en California

Fuente:

http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_Energy_Generating_Systems#mediaviewer/File:Solar_Plant_kl.jpg

3.5.2 Central Termo-Solar con Colectores Fresnel

Las centrales desarrolladas con este sistema son principalmente pilotos de hasta 6 MW, aunque hay algunas más grandes en desarrollo. Se basan en la concentración de los rayos solares utilizando espejos ligeramente curvos que se orientan hacia un reflector secundario al cual se reflejan los rayos del sol hasta un absorbedor en el cual circula un fluido de trabajo, generando directamente vapor saturado. [33]

Los costos actuales para este tipo de central se encuentran en 9.000 USD/kWp. El factor de planta se puede estimar en 50% y la eficiencia en conversión de energía en 30%. Los costos de operación y mantenimiento van desde 60 hasta 70 USD/MW/año. El costo medio de la energía se encuentra entre 42 y 46 centavos USD/kWh. [31]

Algunos países líderes en la tecnología son EEUU, Alemania, Australia y España. La empresa alemana Novatec Solar tiene la central solar de Puerto Errado 1 (PE 1) de 1.4 MW en Murcia (España) operando comercialmente desde el 2009 y Ausra inauguró en 2008 otra de 5 MW en Kimberlina (California). La central solar de Puerto Errado 2 (PE 2) de 30 MW es una versión agrandada de la PE 1 y está en operación en Murcia desde el 2012. [32]



Figura 3.8 Central solar Puerto Errado 1 en el sur de España

Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_t%C3%A9rmica#mediaviewer/File:Luftaufnahme_PE_1.JPG

3.5.3 Central Termo-Solar de concentración en Torre

Este tipo de central termo-solar tiene un rango de potencia estimado entre 10 y 50 MW. Las torres solares, o sistemas de recepción central, utilizan cientos de

miles de reflectores pequeños para concentrar los rayos solares en un receptor central ubicado en lo alto de una torre fija. Algunas centrales cuentan con varias torres que alimentan un bloque de potencia. [33]

Las partes básicas que conforman el sistema son los espejos, la torre de concentración, el sistema de conversión de energía térmica en eléctrica, el sistema de enfriamiento y el fluido de trabajo. El factor de planta se proyecta cercano al 60% para casos de almacenamiento térmico, y entre 35 a 38% sin almacenamiento, mientras la eficiencia en la conversión se encuentra del orden de 20 a 35%. Las torres que alimentan con aire a turbinas a gas en una planta de ciclo combinado pueden ofrecer eficiencias del orden del 35%.

El capital necesario para instalar una torre se puede considerar aproximadamente 4.000 USD/kW con almacenamiento mínimo y 7.000 USD/kW con mayor nivel de almacenamiento y factor de planta de 70%. En términos de operación y mantenimiento, los costos son de 66 USD/kW/año. El costo medio de la energía es cercano a 17,4 centavos USD/kWh. [31]

Un país líder en el desarrollo de este tipo de central solar térmica es España, por sus dos plantas de Sevilla: el PS10 de 11 MW operando comercialmente desde el 2007 y desde el 2009 el PS20 de 20 MW. En el 2011 la central de torres Gemasolar, de igual manera en Sevilla, se incorporó a la red con una potencia de 20 MW. Otros proyectos mayores se están desarrollando en Sudáfrica, Israel y el oeste de EEUU. [32]



Figura 3.9 Central solar PS10

Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Electricidad_solar_de_concentraci%C3%B3n#media_viewer/File:PS10_solar_power_tower.jpg

3.5.4 Central Termo-Solar con Discos Parabólicos

Este tipo de central termo-solar tiene un rango de potencia entre 10 y 25 kW por unidad. Los discos parabólicos concentran los rayos solares hacia un punto focal ubicado en su centro. El aparato completo sigue al sol, con el disco y el receptor moviéndose en conjunto. El calor es absorbido en un motor termodinámico tipo Stirling que produce electricidad a partir de él. [33]

El factor de planta se proyecta en 50 – 60% y la eficiencia en la conversión se encuentra alrededor de 25-30%. El costo de inversión de una central de este tipo es de alrededor de 10.000 USD/kW, con un costo de operación y mantenimiento estimado en 48,2 USD/kW al año. El costo medio de la energía es cercano a 28,3 centavos USD por kWh. [31]

Algunos países, como EEUU y otros de Europa, poseen plantas piloto en operación, como la de Sandia National Laboratories en Nuevo México. Hay una planta de generación comercial que entro en operación en el 2010 en Maricopa, Arizona, con 60 discos que generan 1.5 MW. También en Odeillo, Francia, existe un disco parabólico de 52 kWh. [32]



Figura 3.10 Disco solar parabólico

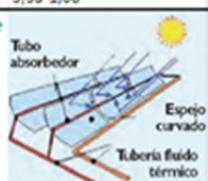
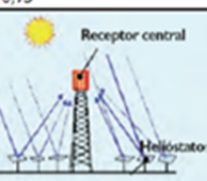
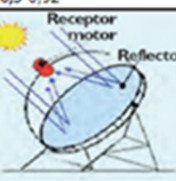
Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_t%C3%A9rmica#mediaviewer/File:SolarStirlingEngine.jpg

3.6 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA

Como se indicó anteriormente, las tecnologías solares-térmicas actualmente más avanzadas y utilizadas son los colectores cilíndrico-parabólicos, las centrales de torre y los sistemas disco-parabólicos, por este motivo se enfocará la comparación entre estas tecnologías. Los valores que contienen la Tabla 3.1 sirven como referencia para dicha comparación entre las centrales termosolares, lo cual servirá de referencia para la selección de la opción más adecuada para aplicaciones en el Ecuador.

Tabla 3.1 Comparación de las características de las Centrales Termosolares [15]

CET	Cilindro Parabólico	Receptor Central	Disco Parabólico
Potencia	30-320 MW*	10-200 MW*	5-25 MW*
Temperatura de operación	390 C	565 C	750 C
Factor de Capacidad			
Anual	23-25 %	20-77 %	25%
Eficiencia Pico	20 % (d)	23 % (p)	29.4 % (d)
Eficiencia Neta			
Anual	11 (d^)-16 %	7 (d^)-20 %	12-25 %* (p)
Estado Comercial	Disponible Comercial	Desmotracion	Prototipo-Demostración
Riesgo Tecnológico	Bajo	Medio	Alto
Almacenamiento	Actualmente hasta 7.5 horas	Si	Baterías
Diseno Híbridos	Si	Si	Si
Costo W instalado			
€/m2	525-229*	525-229*	525-229*
€/W	3,33-2,25*	3,33-2,04*	10,5-1,08*
€/Wp	3,33-1,08*	2-0,75*	10,5-0,92*
<p>*El rango indicado se refiere al periodo 1997-2030 (p)=predicida; (d)=demostrada; (d^)=ha sido demostrada, el resto son valores predichos</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Cilindro-parabólicos</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Receptor central</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Discos parabólicos</p> </div> </div> <p>CET (Centrales Eléctricas Termosolares)</p>			

Con el fin de determinar una opción tecnológica adecuada para un posterior estudio de aplicabilidad en el territorio ecuatoriano, en la Tabla 3.2 se exponen las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías termosolares.

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de las tecnologías Termosolares [15]

Concentrador (CCP)		
Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Centrales conectadas a la red, calor de proceso (unidad mayor construida hasta la fecha: 80 MWe)	<p>Comercialmente disponible—más de 10.000 millones de kWh de experiencia operacional; operan a una temperatura potencial de hasta 500°C (400°C comercialmente probados)</p> <p>Rendimiento anual comercialmente probado del 14% de la producción solar eléctrica a la red</p> <p>Costes de inversión y operación comercialmente probados</p> <p>Mejor empleo del terreno</p> <p>Demanda de material más baja</p> <p>Concepto híbrido probado</p> <p>Capacidad de almacenamiento</p>	<p>El uso de aceites como medios de transferencia de calor restringe las temperaturas de operación a 400°C, lo que origina calidades de vapor moderadas</p> <p>Mucho terreno y agua</p>

Central de torre		
Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Centrales conectadas a la red, calor de proceso a alta temperatura (unidad mayor construida hasta la fecha: 10 MWe)	<p>• Buenas perspectivas a medio plazo de altas eficiencias de conversión con colección solar operando a temperaturas de hasta 1000°C potenciales (565°C probados a 10MW)</p> <p>Almacenamiento a altas T (°C)</p> <p>Operación híbrida posible</p>	<p>Valores de rendimiento anual proyectados, costes de inversión y operación todavía no vistos en operación comercial</p>

Disco Parabólico		
Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Aplicaciones independientes o pequeños sist. eléctricos aislados (unidad mayor construida hasta la fecha: 25 kWe)	<p>Eficiencia de conversión muy alta – máxima de solar a eléctrica de aproximadamente un 30%</p> <p>Operación híbrida posible</p> <p>Experiencia operacional de los primeros prototipos</p>	<p>Fiabilidad tiene que mejorar</p> <p>Todavía por conseguir los costes proyectados de producción en masa</p>

A manera de resumen se enlistan los principales criterios que permitan recomendar la mejor opción tecnológica para las condiciones del Ecuador.

- Criterios técnicos:

Cantidad de radiación requerida, dimensión de terreno requerido, rango de potencia de operación, temperatura de operación, eficiencia, posibilidad de almacenamiento térmico, posibilidad de hibridación, madurez tecnológica y vida útil.

- Criterios económicos y ambientales:

Experiencia comercial, costos de operación y mantenimiento, contaminación y consumo de agua, ocupación de suelo, impacto visual y acústico, cantidad de emisiones y producción de residuos.

3.7 SELECCIÓN DE LA OPCIÓN TECNOLÓGICA PARA ECUADOR

De lo expuesto en la sección anterior, las centrales de torre y los colectores cilíndrico-parabólicos son más apropiados para proyectos de gran tamaño conectados a la red, en el rango de 30-200MW, mientras que los sistemas disco-parabólicos son modulares y pueden ser usados en aplicaciones individuales o en grandes proyectos.

Un reflejo del distinto grado de madurez tecnológica de las distintas tecnologías lo constituyen los actuales proyectos en desarrollo. Mientras se tienen decenas de proyectos con tecnología cilíndrico-parabólica en distintas partes del mundo que totalizarían más de 500MW de capacidad solar, los únicos proyectos de Torre se encuentran en España. [16]

Respecto a los sistemas de disco-parabólico existen unidades en USA y España y hay un gran interés en el desarrollo de esta tecnología en China. Respecto a los colectores Fresnel en Murcia, España se han puesto en marcha dos centrales con esta tecnología con una potencia total de 31MW. [14]

De las tecnologías actuales, las plantas con colectores cilindro parabólicos (CCP) son las que cuentan actualmente con una mayor experiencia comercial. Las plantas SEGS (Solar Electricity Generating Systems) actualmente en operación en California, con sus más de 2,5 millones de metros cuadrados de CCP, son el mejor ejemplo del estado del arte de esta tecnología. Con una capacidad de producción en régimen comercial 354MWe, las plantas SEGS han acumulado una gran experiencia. [16]

Las plantas con CCP son las que presentan actualmente un menor coste para generar electricidad. La tecnología de las plantas termosolares del tipo SEGS está totalmente disponible en la actualidad.

El poco riesgo, desde el punto de vista tecnológico que conlleva la instalación de plantas tipo SEGS es la causa de que existan en la actualidad varias empresas promoviendo la instalación de plantas termosolares de este tipo en un buen número de países con un buen nivel de insolación (Brasil, Egipto, España, Grecia, Grecia, India, México y Pakistán). [16]

Para determinar la tecnología de concentración adecuada para las condiciones del Ecuador, en la Tabla 3.4 se listan los criterios influyentes para la toma de decisión y determinamos según el mayor puntaje, la opción más recomendable. La Tabla 3.3, contiene los valores de puntuación según las referencias de calificación que van de 5 a 1 para criterios de excelente a malo.

Tabla 3.3 Referencias de calificación de criterios

Referencias	Valor
Excelente	5
Muy bueno	4
Bueno	3
Regular	2
Malo	1

Tabla 3.4 Matriz de elección de la tecnología adecuada

CRITERIOS	TECNOLOGIAS		
	Disco Parabólico	Receptor Central	Cilindro Parabólico
Costos de inversión, operación y mantenimiento	2	3	4
Experiencia comercial, madurez tecnológica y vida útil	3	4	5
Eficiencia, rango de potencia y temperatura de operación	3	4	4
Posibilidad de almacenamiento térmico e hibridación	2	3	3
VALORACION TOTAL	10	14	16

De acuerdo a los criterios expuestos anteriormente la opción tecnológica seleccionada para el análisis de su aplicabilidad en el Ecuador es la de concentradores cilindro-parabólicos. Una central solar termoeléctrica con concentradores cilindro-parabólicos tiene los siguientes subsistemas: [17]

- Campo solar
- Sistema de fluido térmico
- Sistema de almacenamiento térmico
- Sistema de generación de vapor
- Sistema de calentamiento auxiliar de fluido térmico
- Ciclo de potencia
- Sistemas auxiliares
- Sistemas eléctricos
- Sistema de control e instrumentación
- Sistemas de suministro y tratamiento de agua
- Sistema de vertidos

Un esquema general de una central solar termoeléctrica con concentradores cilindro-parabólicos se presenta en el siguiente capítulo.

La fuente primaria para generar electricidad con este tipo de central es la energía irradiada por el sol, la cual se focaliza sobre receptores mediante

colectores cilindro-parabólicos, calentando el fluido térmico (por ejemplo fluidos sintéticos como el bifenilo y el óxido de difenilo) que circula por dichos receptores.

El seguimiento del sol para mantener la orientación óptima de los colectores durante todo el día se lleva a cabo mediante un sistema que los mueve en torno a su eje focal y que está orientado según la dirección norte-sur.

La energía térmica almacenada en este fluido térmico se transfiere a otro fluido (agua) que realiza el ciclo termodinámico de agua-vapor de la central, expandiéndose en una turbina. De esta forma la energía térmica acumulada en el vapor de agua se transforma en energía mecánica.

La energía mecánica suministrada por la turbina se transforma en energía eléctrica mediante un alternador y finalmente la energía eléctrica es inyectada a la red general.

Los principios para el cálculo, diseño y operación de este tipo de centrales se detallan en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4

4. CRITERIOS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNA CENTRAL SOLAR TERMICA CON TECNOLOGIA COLECTOR CILINDRO-PARABOLICO – CCP.

4.1 DISEÑO DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGIA CCP.

El diseño de una central con concentradores cilindro-parabólicos debe tener las siguientes características: [17]

- Flexibilidad:

En los actuales mercados de generación eléctrica, la flexibilidad, la posibilidad de arrancar rápidamente, la capacidad para seguir la curva de demanda, y un bajo consumo de agua son factores esenciales para que la central opere en cualquier régimen de funcionamiento con rapidez de adaptación a las condiciones meteorológicas.

- Tiempo de arranque pequeño:

El arranque de la central es uno de los momentos cruciales, ya que se pone en marcha un sistema complejo con múltiples subsistemas y todos deben funcionar de forma correcta, en su orden y en el momento adecuado, por lo que la central debe contar con dispositivos que sumados a las características de esta tecnología faciliten tiempos de arranque pequeños.

- Diseño fiable y disponibilidad:

El diseño de las instalaciones de la central, tanto las productivas como las auxiliares y de servicios debe ser fiable y contar con redundancias del 100% en los equipos esenciales para contar con un alto nivel de disponibilidad de operación. Un aspecto importante en la disponibilidad de la central es su correcto mantenimiento.

- Rendimiento alto:

En el proceso de generación eléctrica un aspecto importante es la conversión de energía, debido a que de las pérdidas de la misma depende el rendimiento de la central el cual debe ser alto en su operación por lo que el diseño del generador de vapor, turbina, alternador y todo el ciclo termodinámico deber ser altamente optimizado.

- Costes de operación bajos:

La tecnología de CCP es una tecnología renovable madura pero nueva en el caso del Ecuador, por lo que es preponderante para que sea competitiva que los costes de generación deben tener un valor bajo, característica que depende de una buena eficiencia que debe tener la central.

- Ambiente, Seguridad, Higiene y Salud:

Se debe cumplir con las normativas relacionadas con protección ambiental, seguridad, higiene y salud. Es necesaria la planificación de actividades

destinadas a la prevención y mitigación de los impactos ambientales así como al control de las condiciones de trabajo que pueden causar accidentes de trabajo, daños a componentes de la central o repercusiones a su producción.

4.1.1 Parámetros y condiciones de diseño de centrales solares térmicas con tecnología CCP

Los parámetros de diseño son los requisitos necesarios que se deben cumplir para dar las condiciones requeridas a un proyecto solar térmico con tecnología CCP. A continuación se presentan los parámetros más importantes: [18]

Radiación de diseño

La radiación de diseño se usa en el dimensionamiento de la potencia de la central, por lo que debe tener un valor cercano a la máxima radiación incidente en el año y deberá ser el valor nominal de diseño del campo solar.

Debido a que la radiación varía a lo largo del año, el criterio más usado para elegir la radiación de diseño es medirla el día 21 de Junio a las 12:00 hora solar, esto para el hemisferio norte. Este momento es el de mayor radiación del año debido a que coincide con el solsticio de verano en el hemisferio Norte y análogamente para el hemisferio Sur la radiación debería ser medida el día 21 de Diciembre a las 12:00 hora solar.

Luego de escoger una radiación de diseño, es posible determinar el calor útil que puede recolectar cada lazo de colector y la demanda térmica del ciclo, y a su vez con estos valores se puede obtener el múltiplo solar de la planta.

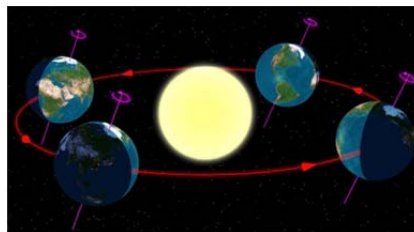


Figura 4.1 Diagrama de las temporadas de la Tierra. Extremo izquierdo: solsticio de verano del hemisferio norte. Delantero derecho: solsticio de verano del hemisferio sur

Fuente:

http://es.wikipedia.org/wiki/Solsticio_de_verano#mediaviewer/File:North_season.jpg

Múltiplo Solar

El múltiplo solar es el cociente entre la potencia térmica útil que proporciona el receptor solar en condiciones de diseño respecto a la potencia térmica que requiere el ciclo de potencia en condiciones de diseño. La ecuación se muestra a continuación:

$$SM_{diseño} = \frac{\dot{Q}_{th, campo\ solar}}{\dot{Q}_{th, bloque\ potencia}} \Big|_{diseño}$$

Debido a que la radiación solar varía a lo largo del día y de las estaciones, la potencia térmica útil producida por el receptor solar será función del tiempo y lo óptimo para el ciclo de potencia es tenerlo funcionando a plena carga.

Para incrementar las horas en que el ciclo de potencia trabaje a plena carga se puede incrementar el múltiplo solar, pero en ausencia de capacidad de almacenamiento térmico, en las épocas de mayor insolación, no será posible aprovechar toda la energía solar disponible por lo que se debe optimizar la combinación múltiplo solar – capacidad de almacenamiento.

Factor de planta

El factor de planta es el cociente entre la energía anual que genera la central y la que produciría si estuviera trabajando las 8760 horas del año a su potencia nominal.

El factor de planta es una medida de la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo, un factor de planta de 100% significa que la central trabaja a plena carga las 8760 horas del año pero esto no es posible porque la central se debe parar para realizar mantenimiento de los equipos o posibles fallas de la misma. El factor de planta de una central de CCP puede alcanzar un 40%.

Adicionalmente, dentro del diseño es importante definir parámetros como: potencia nominal de la central, tamaño del almacenamiento térmico, si implementar caldera diésel de respaldo, temperaturas de entrada y salida del HTF (Heat Thermal Fluid) en el campo de colectores, temperaturas de entrada y salida en los tanques de almacenamiento, etc.

La potencia nominal se mide en megavatios (MW) o kilovatios (kW), dependiendo de la escala de la instalación. El tamaño de sistema de almacenamiento térmico se mide en número de horas y la posibilidad de una hibridación de la central con otra tecnología como biomasa o gas natural con el fin de optimizar el rendimiento de la misma. Luego de determinar la potencia neta de la central es necesario estimar sus consumos propios, lo que entrega una potencia bruta preliminar de la central.

La central solar con la tecnología cilindro parabólico debe captar la energía solar y traspasarla hacia un fluido térmico, o HTF (por sus siglas en inglés) cuya función principal es transportar su energía térmica al ciclo de potencia y producir vapor sobrecalentado que se expande en la turbina produciendo energía. La función secundaria del HTF es entregar su energía térmica a las sales almacenadas, esto se lleva a cabo cuando la radiación solar es mayor que la necesaria para alimentar al bloque de potencia. [18] Un esquema detallado se muestra en la Figura 4.2.

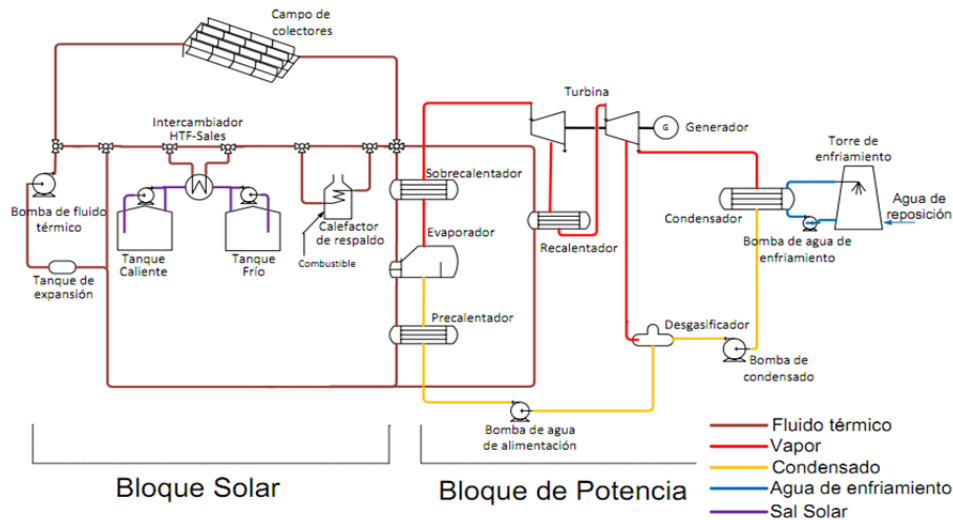


Figura 4.2 Esquema detallado de una central solar térmica con tecnología CCP con dos turbinas (alta y baja presión)

Fuente: http://www.tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112114/cf-chandia_ea.pdf?sequence=1

Algunas condiciones adicionales a tomar en cuenta para el diseño de la central solar térmica con CCP son: [18]

- Condiciones de diseño del ciclo del HTF
- Lugar de emplazamiento
- Colector cilindro parabólico a utilizar
- Elección del fluido térmico HTF
- Elección del fluido térmico a utilizar en el sistema de almacenamiento térmico (SAT)

4.1.2 Dimensionamiento de los componentes del campo de CCP (Bloque Solar)

Se trata del dimensionamiento del área del campo de colectores cilindro parabólico, magnitud que está asociada al tamaño del sistema de almacenamiento térmico. Los demás componentes del bloque solar son dimensionados con respecto al caso de no contar con almacenamiento térmico ya que dicho sistema no aumenta la potencia de la planta sino la cantidad de horas en funcionamiento por tanto la energía anual generada. [18]

Estimación del campo de CCP de la central

En la Tabla 4.1 se resumen los parámetros que influyen en el dimensionamiento del campo de CCP de la central solar térmica.

Tabla 4.1 Dimensionamiento del campo de CCP [18]

Parámetro	Unidad
N° de colectores por lazo	----
N° de lazos	----
Área total CCP	m ²
Potencia Térmica Neta	MW _{th}
Flujo Total de HTF	kg/s
Flujo de HTF por lazo	kg/s
Velocidad de flujo en lazo	m/s

La energía almacenada por el sistema de almacenamiento térmico (SAT) debe permitir a la central operar lo más cerca posible de su capacidad nominal durante un tiempo determinado.

La potencia térmica requerida para una planta de CCP sin almacenamiento térmico, está dada por:

$$Q_{CCP} = \frac{P_{bruta}}{\eta_{bruto\ ciclo}}$$

Se debe considerar en el diseño que si el SAT no tuviera pérdidas térmicas, la energía a almacenar sería la potencia térmica multiplicada por el número de horas en que se requiere que la central opere, sin embargo existen pérdidas térmicas dentro de los tanques de almacenamiento (0,32% de la potencia térmica almacenada) y durante el intercambio térmico en los intercambiadores de calor (3%). [34]

De esta forma, para “x” horas de almacenamiento considerando las pérdidas térmicas del sistema, la energía que el SAT deberá almacenar es:

$$Q_{sat} = \text{cap de almacenamiento en horas} \times \text{pot termica} \times (1 + \text{perd en tanques almacenamiento} + \text{perd en intercambiadores de calor})$$

La estimación del campo solar (m²) depende de la capacidad de almacenamiento. A mayor capacidad, mayor es el múltiplo solar y por tanto, mayor número de colectores se requerirán. El campo solar se compone de una serie de filas de colectores formando lazos y estos, a su vez, formando los subcampos que finalmente conforman el campo de captación.

La separación entre filas debe ser tal que los colectores de una fila no ensombrezcan a los colectores de las adyacentes. La longitud de cada hilera de colectores depende del número de colectores que la formen, siendo habitual tener 4 o 6 colectores por lazo. Aproximadamente se requieren entre 5.000 m² y 10.000 m² por cada MW instalado dependiendo de la cantidad de recurso solar.

Configuración del campo de colectores

La configuración con la cual se ubican los colectores en la central es importante, debido a que las tuberías pueden suponer hasta un 10% del costo de inversión, además a mayor recorrido de tuberías incrementa la potencia de bombeo requerida en el campo de colectores.

La potencia de bombeo es una de las pérdidas parásitas más importantes en el sistema, también en menor medida las pérdidas de calor en dichas tuberías reducen la potencia térmica útil que puede aportar el campo solar. [18]

Para minimizar estas pérdidas, se debe disminuir el recorrido de tuberías disponiéndolas en la posición óptima de acuerdo al área del campo de colectores, para campos de colectores menores a 400.000m^2 la configuración más eficiente es en “I” y para campos con área mayor a 400.000m^2 la configuración más eficiente es en “H”. [35]

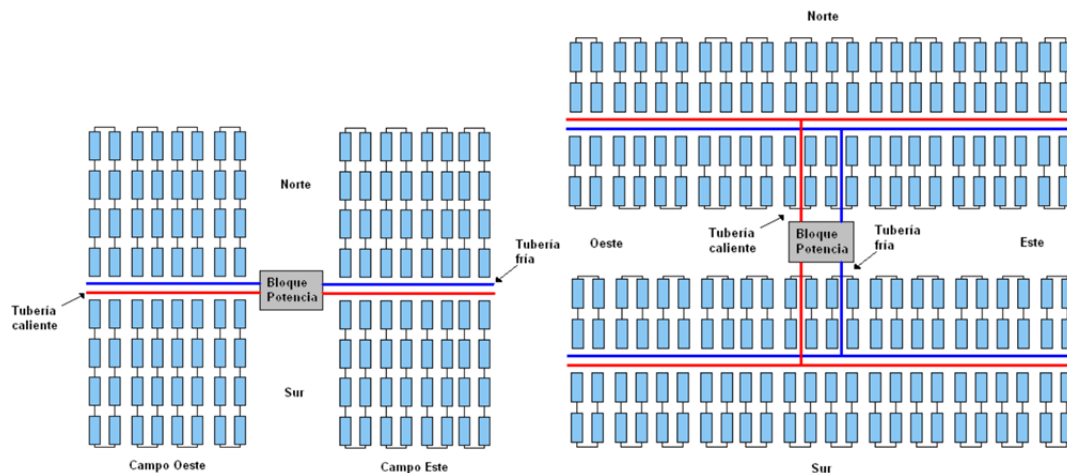


Figura 4.3 Configuraciones en “I” y en “H” para campo de colectores

Fuente: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/14683/PFC_Daniel_Serrano_Garcia.pdf?sequence=1

Los demás elementos del bloque solar a tener en cuenta dentro del dimensionamiento son:

- Tanques de sales fundidas
- Intercambiador de calor sal-aceite
- Bombeo de HTF
- Tuberías de alimentación y descarga de HTF
- Pérdida de Carga Global
- Bomba de HTF
- Tanque de Expansión
- Carga de HTF en el sistema
- Sistema de calentamiento de respaldo de HTF
- Sistema Anti-congelamiento de HTF

Todos estos elementos, si bien son importantes durante el diseño de la central, no forman parte del alcance de esta tesis, por lo que no se detallan en este documento.

4.1.3 Dimensionamiento del bloque de potencia

A partir de la interface entre el bloque solar y el bloque de potencia, es decir, el flujo nominal de HTF que es enviado al circuito de intercambiadores de calor:

sobrecalentador – evaporador precalentador (Figura 4.2), se puede determinar el flujo de agua/vapor en el bloque de potencia.

Para obtener el flujo de HTF proveniente del bloque solar como para dimensionar los demás componentes del bloque de potencia como: bombas, torre de enfriamiento, turbina, etc., se requiere conocer la potencia nominal de la central solar.

Consideraciones de diseño [18]

La turbina de vapor – generador es el principal equipo condicionante del rendimiento del ciclo termodinámico de la central solar. Una vez determinada la línea de expansión del vapor en la turbina y los rendimientos o pérdidas del conjunto turbina – generador, se determina el flujo de vapor que se expandirá en la turbina para generar la potencia neta deseada.

Este flujo de vapor y las condiciones del vapor en la admisión, extracciones y descarga de la turbina, definen la capacidad térmica de los equipos de transferencia de calor del ciclo de potencia y de los equipos de bombeo.

Las condiciones de presión y temperatura de la expansión en la turbina, en la admisión y descarga del equipo, dependen de la temperatura máxima de la fuente de calor por ejemplo el HTF a 393°C. La temperatura de bulbo húmedo del aire en la torre de enfriamiento determina la mínima temperatura de condensación del vapor en la descarga de la turbina, por ejemplo 14°C para condiciones de operación nominal.

En estas condiciones, por ejemplo el vapor sobrecalentado de admisión a la turbina puede alcanzar un máximo de 380°C y el condensado de descarga sería en 0,06 bar y 36°C, respetando los rangos permitidos de la torre de enfriamiento y el condensador.

Conocidos los límites de temperatura para la expansión total en la turbina, el recalentamiento debe hacerse a una presión entre 18 y 25 bar para evitar la condensación al final de la etapa de Alta Presión, con una eficiencia isoentrópica de su expansión en torno al 85%, para ser descargado al condensador a 0,06 bar y 36°C.

Finalmente la presión en el recalentamiento tomando en cuenta el rango permitido se fijaría en 21 bar y considerando un rendimiento isoentrópico de 85% para la expansión del vapor sobrecalentado (la primera admisión de la turbina), la presión de sobrecalentamiento debe ser 86 bar, porque para presiones mayores, al final de la primera expansión, el vapor sale húmedo.

Características a considerar en la selección de la turbina

La importancia del aprovechamiento máximo de la radiación solar determina que la turbina debe tener las siguientes características: [18]

- Debe tener la capacidad de partida rápida, importante en los meses de invierno o alta nubosidad, en que las horas de sol son escasas o intermitentes.

- Debe poder realizar cambios rápidos de carga debido a las variaciones horarias de la radiación solar durante el día.
- Debe tener un rendimiento aceptable al operar a carga parcial debido a que la radiación solar disminuye en invierno respecto al verano.
- El rango de operación a carga parcial debe ser amplio, idealmente que pueda trabajar a cargas bajas como un 10%.

Dimensionamiento del bloque de potencia

Las condiciones de operación de la turbina de vapor son las mostradas en la Tabla 4.2, las que corresponden al esquema de la Figura 4.4 que indica los puntos relevantes de la operación en la turbina. [18]

Tabla 4.2 Condiciones de operación de la Turbina de vapor

Punto del Diagrama	Punto de operación
1	Vapor sobrecalentado
2	Descarga primera etapa
3	Vapor recalentado
4	Extracción al desgasificador
5	Descarga al condensador

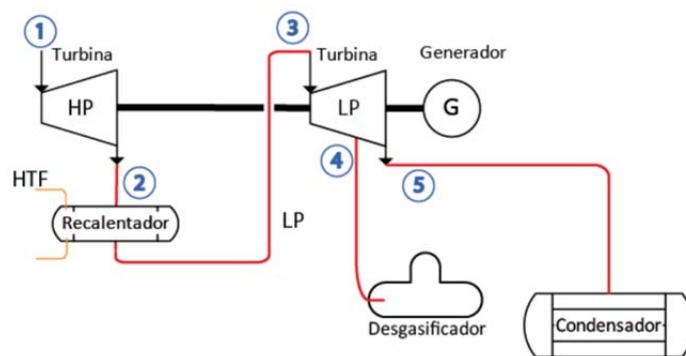


Figura 4.4 Esquema de expansiones en la Turbina de Vapor

Fuente: http://www.thesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112114/cf-chandia_ea.pdf?sequence=1

El ciclo de potencia de las centrales de CCP es el de Rankine y sus estados se definen por los números del 1 al 4 en la Figura 4.5: 1. Vapor sobrecalentado. 2. Vapor húmedo. 3. Líquido saturado. 4. Líquido subenfriado. Donde sus procesos son: [36]

- *Proceso 1-2:* Expansión isoentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en la turbina de vapor y se genera potencia en el eje de la misma.
- *Proceso 2-3:* Transmisión de calor a presión constante desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor).

- *Proceso 3-4:* Compresión isoentrópica del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en caldera.
- *Proceso 4-1:* Transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera. Este vapor sobrecalentado de alta presión es el utilizado por la turbina para generar la potencia del ciclo.

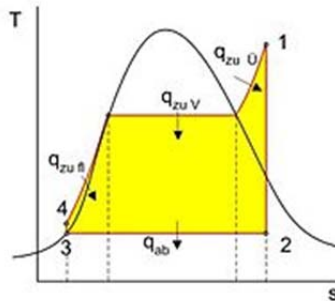


Figura 4.5 Diagrama Temperatura-Entropía del ciclo de Rankine

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Rankine#mediaviewer/File:CR-Prozess_T-s-Diagramm.jpg

El ciclo de potencia de una central de CCP se describe de la siguiente manera. Un caudal de agua es bombeado hacia el generador de vapor donde pasa a estado gaseoso debido a un intercambiador aceite/agua. Atraviesa una serie de turbinas de alta presión donde va expandiéndose y con ello generando energía. Cuando el agua entra en fase saturada (mezcla de líquido y gas) vuelve a calentarse mediante otro intercambiador aceite/agua, volviendo a formar vapor. El vapor podrá volver a pasar por otras turbinas de baja presión, para seguir generando energía.

Parte del caudal ha sido extraído en mitad del cuerpo de turbinas y el que no, pasa por un condensador para devolverle el estado líquido para ser bombeado nuevamente. Este líquido se precalienta mediante diferentes intercambiadores de calor con el fluido que había sido extraído. El total del caudal vuelve al generador de vapor.

El generador de vapor se compone de una serie de intercambiadores de calor aceite/agua en los que el aceite proveniente del campo solar cede su calor al agua. El generador de vapor tiene dos funciones: la generación principal y la de recalentamiento.

En la generación de vapor principal el total del caudal del agua viene precalentado debido a los vapores extraídos de las turbinas. Cuando llega al generador de vapor, atraviesa el precalentador o economizador, donde alcanza la temperatura próxima a la evaporación, posteriormente pasa por el evaporador, donde pasa a estado gaseoso y finalmente, en el sobrecalentador alcanza la temperatura deseada.

Al recalentador en cambio no llega todo el caudal del agua, ya que parte puede haber sido extraída de las turbinas para el precalentamiento del agua. El flujo que llega es mezcla de líquido y vapor. Solo la parte de la mezcla en estado

gaseoso que atraviesa las turbinas genera potencia, por lo que la mayor parte de la mezcla debe ser vapor.

A continuación se detallan los principales equipos adicionales del bloque de potencia que deben ser considerados en el dimensionamiento:

- Interface Sistema Solar con Bloque de Potencia
- Sistema Condensador – Torre de Enfriamiento
- Desgasificador
- Bombeo en ciclo de potencia

No se incluye la descripción del diseño de estos equipos al no ser parte del alcance de esta tesis.

4.2 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGÍA CCP.

En la Figura 4.6 se representa un esquema de una central solar térmica cuyo sistema concentrador-receptor es un campo de captadores cilindro parabólico:

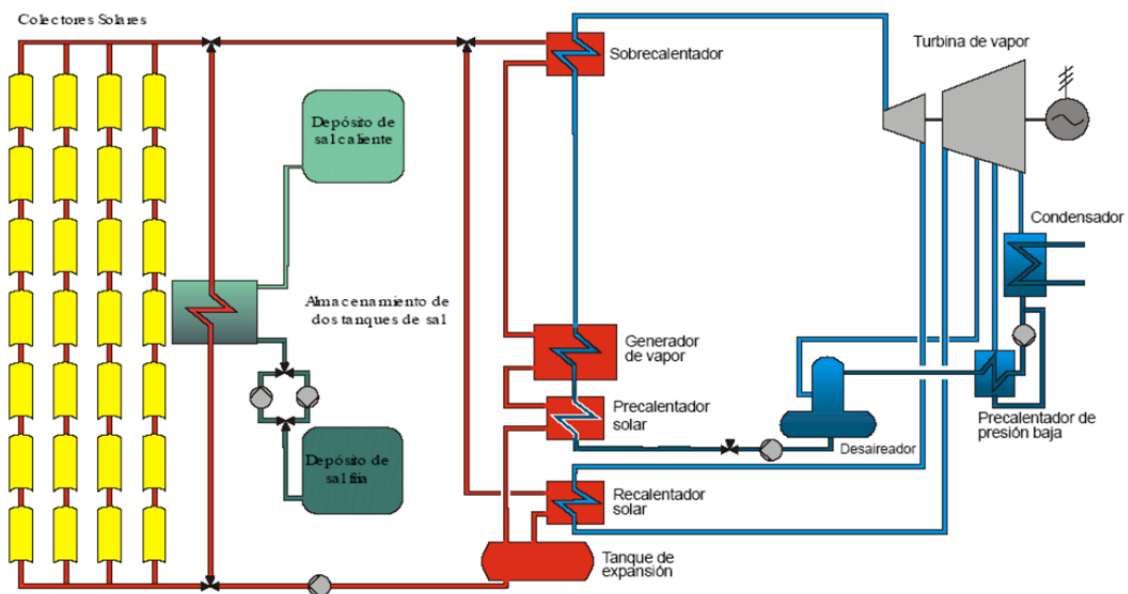


Figura 4.6 Central solar térmica con campo de CCP

Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4965/fichero/CAP%CDTULOS%252FCAPITULO+1.+INTRODUCCION+A+LAS+CENTRALES+SOLARES+TERMOELECTRICAS.pdf>

Se explica a continuación, los sistemas de los que se compone una central solar térmica de este tipo. [13]

- **Campo de captadores**

Un campo de concentradores cilindro-parabólicos está compuesto por filas paralelas de éstos. Cada fila, se integra con varios captadores conectados en serie de manera que el fluido de trabajo que circula por los tubos absorbentes es calentado conforme circula desde la entrada a la salida de cada fila. La potencia total requerida queda fijada con el número de filas que se colocan en

paralelo. Donde $Q_{\text{útil_lazo}}$ es el calor útil obtenido por cada lazo, la potencia térmica nominal del campo de CCP en función del número de filas o lazos se estima con la siguiente formula:

$$Q_{CCP_final} = Q_{\text{útil_lazo}} \cdot n^{\circ} \text{ lazos}$$



Figura 4.7 Vista de un campo típico de captadores cilindro parabólicos

Fuente: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4965/fichero/CAP%CDTULOS%252FCAPITULO+1.+INTRODUCCION+A+LAS+CENTRALES+SOLARES+TERMOELECTRICAS.pdf>

- **Sistema de almacenamiento térmico**

Los objetivos de un buen almacenamiento térmico en una central solar térmica con CCP son:

- Almacenamiento de energía en condiciones climatológicas transitorias.
- Aumento del factor de capacidad de la planta.
- Producción de la electricidad más distribuida.
- Estabilidad mecánica y química del material almacenado.
- Buena transferencia de calor entre el fluido de transferencia de calor y el fluido de transferencia térmico.
- Bajas pérdidas térmicas.
- Facilitar el control de la planta.

Este tipo de sistema se caracteriza por almacenar el calor en un medio diferente al fluido de trabajo. El aceite actúa como medio de transferencia de calor entre el campo de colectores y el material donde se almacena la energía térmica en forma de calor sensible. El aceite circula a través de cilindros dispuestos entre las placas superpuestas del material de almacenamiento, transfiriendo o almacenando energía térmica de las placas.

El almacenamiento en sales fundidas tiene un tanque caliente y un tanque frío aislados térmicamente y su volumen puede contener la totalidad del fluido de trabajo. El tanque caliente se llena con las sales fundidas, desde el campo solar, donde llegan desde el tanque frío, que queda vacío. La descarga se produce recuperándose el calor al extraer las sales del tanque caliente y luego de enfriadas son enviadas al tanque frío siguiendo el proceso en sentido inverso. En la Figura 4.8 se observa un tanque de almacenamiento de sales.



Figura 4.8 Tanque de almacenamiento de sales

Fuente:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4965/fichero/CAP%CDTULOS%252FCA PITULO+1.+INTRODUCCION+A+LAS+CENTRALES+SOLARES+TERMOCENTRICAS.pdf>

- **Sistema de vapor**

Es el componente donde la energía térmica suministrada por el sistema solar es cedida a un circuito agua/vapor. Así se produce el vapor necesario para alimentar a la turbina. Por tanto, el generador de vapor es la interface entre el sistema solar (campo de captadores y sistema de almacenamiento) y el ciclo de vapor.

En la Figura 4.6, el generador de vapor está representado por cuatro cuerpos:

- *Precalentador o Economizador*, donde el agua se precalienta hasta una temperatura próxima a la de evaporación.
- *Evaporador o Generador de vapor*, recorrido por el flujo bifásico.
- *Sobrecalentador*, donde el vapor se calienta a la temperatura máxima del ciclo, superior a la de saturación para la presión de trabajo.
- *Recalentador*, donde se recalienta el vapor entre el cuerpo de alta y el de media presión de la turbina, para aumentar la temperatura media de aportación y por ello mejorar el rendimiento del ciclo.

- **Caldera auxiliar de combustión fósil**

Las centrales solares térmicas que disponen de esta combustión auxiliar se denominan híbridas. Para plantas comerciales cuya finalidad es la venta de energía eléctrica, es un componente necesario ya que no solo complementa al sistema de almacenamiento en el desacople entre el campo solar y la isla de potencia, sino que también aumentará la producción.

- **Depósito o tanque de expansión**

Sirve para que el aceite pueda contraer ante una bajada de temperaturas por debajo de la temperatura de operación, o dilatar ante una subida de temperaturas además de funcionar como amortiguador de la temperatura de entrada al campo solar.

- **Sistema de Conversión de Potencia**

Es donde tiene lugar el aprovechamiento de la energía térmica suministrada por el sistema solar, para transformarse en energía eléctrica. En una central de CCP el ciclo de potencia que se utiliza es el ciclo de Rankine o de Vapor.

El agua es uno de los fluidos de trabajo más disponibles y adecuados para emplear en un ciclo de potencia. La mayoría de las centrales termoeléctricas (convencionales, de biomasa, nucleares, termosolares) emplean agua como fluido de trabajo del ciclo de potencia.

En la Figura 4.9 se observa el esquema básico de un ciclo de Rankine, donde se muestran los equipos físicos por los que pasa el agua al describir el ciclo.

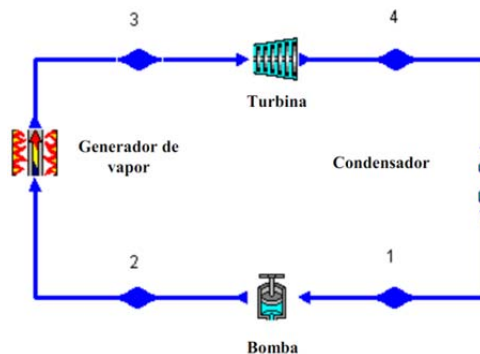


Figura 4.9 Esquema básico de un ciclo de Rankine

Fuente: <http://www.todomonografias.com>

El agua primero pasa por el generador de vapor donde recibe el aporte de energía térmica al ciclo de potencia, que provoca su evaporación y sobrecalentamiento. Este vapor se dirige a la turbina de vapor donde se expande transformándose la energía térmica en mecánica, que se usará para mover el generador eléctrico. A la salida de la turbina se extrae el calor residual del ciclo en el condensador, nuevamente produciendo el paso a fase líquida del agua, que se dirige a una bomba que aumenta su presión para vencer las pérdidas de carga en el generador y proporcionar a la turbina la presión requerida en su entrada.

- **Sistema de Fluido Térmico HTF**

El fluido de trabajo más usado en los captadores cilindro parabólicos es el aceite térmico. Para trabajar a temperaturas de hasta 395°C, el aceite que se utiliza es el Therminol VP-1, que consiste en una mezcla eutéctica del 73,5% de óxido de difenilo y 26,5% de bifenilo. El inconveniente de este aceite es su alto punto de congelación (+12°C), lo que obliga a mantenerlo en todo momento por encima de esa temperatura para evitar que se congele y bloquee el circuito de tuberías.

4.3 PRINCIPIOS DE CONTROL DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGÍA CCP.

En las centrales solares térmicas el sistema de control aún no se encuentra totalmente desarrollado, la tecnología para el control automático se encuentra instalada pero aún no se cuenta con un software eficiente que permita hacerlo, las actuales centrales son manuales. [19]

El arranque, la selección del modo de funcionamiento, el control de temperatura y presión, la refrigeración y cualquier otro parámetro son controlados manualmente, según las decisiones del operador de la central. Una

desventaja de esto es la variabilidad de funcionamiento de la central según el operador que se encuentre de turno. Las ventajas de tener un control automatizado son: [19]

- Menor número de operadores, mayor seguridad y rendimiento.
- La central siempre operara en el punto óptimo y no en un punto escogido el operador.
- Menor número de averías e incidentes.

La estructura del sistema de control de una central solar térmica de CCP consiste en varios sistemas de control independientes. Los subsistemas de control principales son: [19]

- **Sistema de Control del Campo Solar**

Está compuesto por un sistema de control central y controladores locales. El sistema de control central orienta los colectores y hace seguimiento de temperaturas a la entrada y salida del campo. Las claves de la automatización completa del sistema de control del campo solar son:

- Disponer de válvulas automáticas.
- Disponer de datos meteorológicos como radiación, humedad, velocidad de viento, temperatura.

Contando con estos elementos es posible conseguir que la regulación del campo solar se lleve a cabo automáticamente.

- **Sistema de Control de la Isla de Potencia**

Regula los fluidos a través de los equipos para producir un intercambio de calor entre el aceite y el ciclo agua-vapor, manteniendo el control de variables como temperaturas, presiones y caudales.

Así se controla los variadores de velocidad de las bombas del fluido térmico, las válvulas del aceite, las válvulas de salida del tren del generador de vapor, las bombas del ciclo termodinámico y los niveles de los tanques.

Por separado se encuentra el sistema de control de la turbina que se encarga del arranque y parada de la turbina, de la regulación de la carga y del control de parámetros que activarían las prevenciones para proteger la turbina. Aparte de estos dos subsistemas se tienen otros sistemas de control pertenecientes a cada sistema auxiliar (caldera auxiliar, sistema contra incendios, etc.)

La operación manual de la central hace que pocas veces opere en el punto óptimo de diseño. El operador tiene que tomar decisiones que pueden no ser la opción más adecuada y podrían comprometer la rentabilidad de la central o la seguridad de la misma.

Así, el fallo en cierres de bombas, la degradación acelerada del aceite, la corrosión en algunas partes de la instalación o el desequilibrio de presiones del campo solar a menudo se relacionan con una deficiente operación.

Sería ideal que una planta solar térmica con CCP arranque y pare automáticamente, la dificultad está en la medición de las condiciones atmosféricas. Para ser automatizada es necesario que la central cuente con algunas estaciones meteorológicas debido a que las condiciones de radiación o temperatura presentes en una zona de la central pueden ser diferentes a las presentes en otra. Este es un tema que se puede desarrollar en futuras tesis o proyectos de investigación.

La ausencia de válvulas automáticas para su regulación condiciona la posibilidad de una automatización completa, otra dificultad es la inversión y el tiempo necesario para el desarrollo de un sistema de control que englobe a los diferentes sistemas de la central.

El sistema de control debe permitir que las centrales solares térmicas de CCP puedan cumplir su plan de producción esperado y evitar trabajar fuera del punto de diseño, por consiguiente reducir el número de averías e indisponibilidad provocados por una operación deficiente. [19]

4.4 PRINCIPIOS DE MANTENIMIENTO DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA CON TECNOLOGIA CCP.

El mantenimiento de una central solar térmica con CCP se realiza para prevenir la ocurrencia de una falla o error en un sistema, maquinaria o equipo. Existe además la necesidad de optimizar el rendimiento de las unidades y componentes industriales (mecánicos, eléctricos, y electrónicos) de los procesos dentro de las instalaciones de una central de este tipo. [20]

El objetivo del mantenimiento es contar con instalaciones en óptimas condiciones en todo momento, para asegurar una disponibilidad total del sistema en todo su rango de performance, lo cual se basa en la carencia de errores y fallas.

El mantenimiento debe procurar un desempeño continuo y operando bajo las mejores condiciones técnicas, sin importar las condiciones externas (ruido, polvo, humedad, calor, etc.) del ambiente al cual este sometido el sistema. El mantenimiento debe estar destinado a: [20]

- Optimizar la producción del sistema
- Reducir los costos por averías
- Disminuir el gasto por nuevos equipos
- Maximizar la vida útil de los equipos

Los procedimientos de mantenimiento deben evitar las fallas, por cuanto una falla se define como la incapacidad para desarrollar un trabajo en forma adecuada o simplemente no desarrollarlo. Un equipo puede estar fallando pero no estar malogrado, puesto que sigue realizando sus tareas productivas, pero no las realiza con la misma efectividad que un equipo en óptimas condiciones. En cambio un equipo malogrado o averiado no podrá desarrollar ninguna tarea bajo ninguna circunstancia.

El costo de la gestión y desarrollo del mantenimiento de una central solar térmica no debe ser exagerado, debe estar de acorde con los objetivos propios del mantenimiento, pero sin denotar por ejemplo, un costo superior al que

implicaría el reemplazo por maquinaria nueva. Entre los factores de costo se encuentran: mano de obra, costo de materiales, repuestos, piezas nuevas, energía, combustibles, pérdidas por la no producción.

Los costos de operación y mantenimiento de una central de CCP se estiman en alrededor de 70 a 140 USD/kW al año.

El plan de mantenimiento completo de una central termo solar de CCP contempla el mantenimiento programado de todos sus sistemas: [21]

- Campo solar
- Sistema HTF
- Tren de generación de vapor
- Ciclo Agua-Vapor
- Turbina de vapor + generador
- Sistema de control
- Sistema de alta tensión
- Línea de alta tensión
- Sistema de baja tensión
- Sistema de refrigeración principal
- Sistema de refrigeración de equipos
- Toma de agua
- Planta de tratamiento de agua
- Sistema contra incendios

En la determinación de las tareas a realizarse en el mantenimiento de la central se debe toma en cuenta: [21]

- Las recomendaciones de los fabricantes para evitar perder las garantías de éstos.
- El mantenimiento legal.
- El organigrama habitual y el personal disponible para realizar mantenimiento programado.
- La radiación solar y su distribución anual.
- Las averías más graves y probables, pues el plan de mantenimiento está orientado a evitarlas.

4.5 ESTIMACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE UNA PLANTA CCP

A continuación se presenta un ejemplo de estimación de los principales valores de una planta CCP. Partiendo de la cantidad de recurso solar disponible en el sitio, se determina la superficie necesaria para generar 5 MWe, tomando en cuenta las características del sitio de emplazamiento. A fin de buscar la optimización de la central propuesta con un sistema de respaldo (que se detalla en las secciones 5.5 y 5.6 del siguiente capítulo) se plantean dos potenciales emplazamientos:

- La central termoeléctrica El Descanso, ubicada a 15 Km de la ciudad de Cuenca (Longitud: -78.88381, Latitud: -2.840168).
- El Relleno Sanitario de Pichacay, ubicado a 21 km de la ciudad de Cuenca (Longitud: -78.930779, Latitud: -2.9666236).

La eficiencia del ciclo de potencia en una central de CCP es cercana al 35%, el calor a aportar por el campo de colectores al ciclo de potencia considerando una eficiencia del 30% es: [18]

$$Q_{CCP} = \frac{P}{n} = \frac{5 \text{ MW}_e}{0,3} = 16,7 \text{ MW}_{th}$$

De acuerdo a la sección 4.4.1, como valor de diseño para la radiación solar directa (DNI) tomamos 640 W/m^2 , valor medio obtenido a las 12 horas solar del mes de diciembre en los emplazamientos seleccionados, los cuales por encontrarse relativamente cerca es coincidente. Dicho valor se ha obtenido de la base de datos meteorológicos de la NASA, Figura 4.10.

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface At Indicated GMT Times (kW/m²)

Lat -78.931	Dec
Lon -2.967	
Average@00	0.20
Average@03	0.26
Average@06	0.38
Average@09	0.56
Average@12	0.64
Average@15	0.57
Average@18	0.39
Average@21	0.25

Figura 4.10 Radiación de diseño

Fuente: Base de datos de la NASA

El colector a considerar en el dimensionamiento es el Eurotrough SKAL-ET 150 [37] cuya estructura está construida por sub-módulos idénticos, misma que es denominada “Montaje del colector solar” (SCA por sus siglas en Inglés).

Cada SCA o colector tiene un área de apertura de $817,5 \text{ m}^2$ y su eficiencia puede alcanzar valores del 75%. El calor útil por cada colector considerando una eficiencia de 70% es: [18]

$$Q_{util} = \text{DNI} * n * A_{colector}$$

$$Q_{util} = 640 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0.7 * 817,5 \text{ m}^2$$

$$Q_{util} = 366 \frac{\text{kW}}{\text{SCA}}$$

Los colectores conectados en serie se denominan “lazo”. Cada lazo está conformado generalmente de 4 colectores, por lo que operando a plena carga, el calor absorbido por cada lazo es:

$$Q_{util_lazo} = 4 * Q_{util} = 4 * 366 = 1,5 \frac{\text{MW}}{\text{lazo}}$$

El número de lazos está dado por la fracción entre el calor aportado por cada lazo y el calor requerido por el bloque de potencia:

$$N_{\text{lazos}} = \frac{Q_{\text{CCP}}}{Q_{\text{util_lazo}}}$$

Las pérdidas de calor en la central solar SEGS VI [34] bordean el 5% del calor útil captado por los colectores, valor que asumiremos para el cálculo, por lo tanto:

$$N_{\text{lazos}} = \frac{Q_{\text{CCP}}}{Q_{\text{util_lazo}}} = \frac{16,7 \text{ MW}}{1,5 * 0,95 \frac{\text{MW}}{\text{lazo}}} = 12 \text{ lazos}$$

El área total de captación solar del campo de colectores es: [18]

$$A_{\text{campo CCP}} = N_{\text{lazos}} * N_{\text{colec x lazo}} * A_{\text{colector}} = 12 * 4 * 817,5 \text{ m}^2 = 39240 \text{ m}^2$$

En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de los valores estimados:

Tabla 4.3 Principales características estimadas

Potencia nominal	5 MW
Radiación de diseño	640 W/m ²
Eficiencia del ciclo de potencia	30%
Eficiencia del colector	70%
Numero de colectores por lazo	4
Numero de lazos	12
Número total de colectores	48
Área total del campo de CCP	39240 m²

En referencia a los valores calculados, se constata que la cantidad de área necesaria para instalar un campo de CCP depende directamente del recurso solar disponible en el emplazamiento, puntualmente en el caso de los emplazamiento seleccionados para este ejemplo, la cantidad de recurso puede considerarse como aceptable y ambos sitios dispondrían del área necesaria para instalar 5 MW de CCP, debido que su área total (El Descanso: 96919 m² y Pichacay 160000 m²) es mayor al valor estimado (39240 m²).

De lo expuesto anteriormente, se concluye que para estimar los principales valores de una central CCP se considera el área total disponible del emplazamiento y la cantidad de recurso solar en el sitio ya que de esto depende la potencia de la central, el área del campo de colectores y por tanto la cantidad de colectores a usar.

Otro aspecto a considerar es la determinación del tipo de colector cilindro parabólico a usar, además del fluido térmico para el ciclo de potencia y de igual manera en el caso que se contara con un sistema de almacenamiento térmico, éste último no se considera en el presente ejemplo.

En el siguiente capítulo se presentará la situación mundial actual en cuanto a la aplicación de la tecnología CCP junto con criterios que permitan determinar la

aplicabilidad de esta tecnología para generación eléctrica en el Ecuador analizando sus impactos sociales, ambientales y económicos. También se plantea la hibridación de la central CCP a fin de optimizar su producción.

CAPÍTULO 5

5. VIABILIDAD TÉCNICA, AMBIENTAL Y ECONÓMICA PARA LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP EN EL ECUADOR.

5.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL USO DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP PARA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

La capacidad mundial actual total instalada de plantas solares térmicas de colectores cilindro parabólicos es de 354 MW con una disponibilidad de más del 95%. Las plantas típicas actualmente se diseñan para que suministren una potencia eléctrica desde 30 a 80 MW. En un futuro próximo se van a construir plantas de más de 200 MW como la que está construyendo Abengoa en el desierto de Mojave en Estados Unidos, con una potencia de 250 MW y un costo estimado de dos mil millones de dólares. [22]



Figura 5.1 Planta de Abengoa en Mojave Estados Unidos

Fuente: <http://www.abengoasolar.com/web/es/index.html>

Todas las plantas termosolares con CCP realizadas hasta la fecha utilizan un ciclo Rankine de vapor para producir energía eléctrica. Por lo tanto, en un futuro se tenderá a la posibilidad de la producción directa de vapor en los tubos absorbedores. [22]

Con el fin de reducir costes y simplificar el mantenimiento de las plantas con colectores cilindro-parabólicos, se están desarrollando diversos proyectos en promoción con carácter de explotación en régimen comercial en España, EE.UU (Nevada), Marruecos, Argelia, Israel, Egipto, India, Irán, Sudáfrica y México. Así, en Boulder (Nevada) ya está en marcha la tercera mayor planta termoeléctrica del mundo, se trata de una planta de Solargenix de 64MW constituida por 19.300 colectores cilindro-parabólicos. [16]

Entre las vías más empleadas de reducción de costes destacan: el aporte energético auxiliar a partir de combustibles fósiles (centrales híbridas), la integración de los colectores solares en plantas de ciclo combinado, la utilización de métodos innovadores de concentración solar (reflectores lineales de Fresnel, , etc.), así como la generación directa de vapor en los propios tubos receptores de los colectores. Adicionalmente, existen iniciativas para desarrollar sistemas de almacenamiento térmico en centrales “solo solar” y aumentar la durabilidad de los tubos absorbedores. [16]

Así, pese a la limitación tecnológica que supone que la máxima temperatura de trabajo de este tipo de colectores no supera los 450 grados centígrados, la incorporación de todas estas mejoras, la previsible producción en masa de los componentes y la aparición de un mayor número de suministradores, podrían permitir reducir los costes de generación.

El elevado grado de avance y el interés en la tecnología de colectores cilindro-parabólicos para la producción de electricidad contrasta con la falta de desarrollo de la que adolece la de otras posibles aplicaciones que también resultan interesantes para este tipo de colectores, como son el calor de proceso y generación de vapor para procesos industriales en sectores como alimentación, textil o papel, que requieren temperaturas del orden a las obtenidas con estos sistemas. [16]

Los países ubicados en el denominado Cinturón Solar Terrestre poseen unas condiciones climáticas que hacen muy atractivas estas aplicaciones, sin embargo, la falta de colectores solares y equipos industriales adaptados para este tipo de usos, hace necesaria una fuerte actividad de investigación y desarrollo (I+D) que permita alcanzar el mismo nivel de desarrollo que la generación de electricidad. [16]

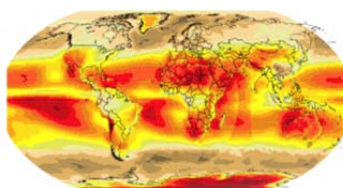


Figura 5.2 Cinturón Solar Terrestre

Fuente: <http://www.eoi.es/blogs/alfonsomedal/files/2012/06/potencial-solar2.png>

El Cinturón solar se sitúa entre las latitudes $\pm 35^\circ$ respecto al ecuador y nuestro país se encuentra dentro del mismo. En la Figura 5.2 se observa las zonas del planeta donde se concentra la radiación, lo cual es un importante indicio del potencial de esta energía.

Países de la región del Cinturón solar como los ubicados en África, Oriente Medio, Sureste Asiático, y Sur América tienen un alto potencial de energía termosolar, por lo que de igual manera el Ecuador cuenta con el recurso solar necesario que permitiría desarrollar esta tecnología.

Por ejemplo, además de la aplicación para generación de electricidad, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) está promoviendo diversas tareas entre las que se destaca “Solar Heat for Industrial Process” (SHIP) con el fin de aprovechar las experiencias y conocimientos sobre energía solar térmica aplicada a procesos industriales. [16]

5.2 LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP Y SUS IMPACTOS SOCIO-AMBIENTALES

En general, la implementación de una central solar, de cualquier tipo, presenta algunos impactos socio-ambientales positivos, entre los que se pueden citar los siguientes: [17]

- Empleo de trabajadores durante el período de construcción de la central y creación de puestos de trabajo permanentes para su operación y mantenimiento.
- Aprovechamiento máximo de los recursos nacionales de mano de obra, materiales y suministros de construcción, dando un impulso a la creación

de puestos de trabajo y un grupo nacional para este sector de tecnología innovadora.

- Adquisición de la experiencia necesaria para el desarrollo de un proyecto basado en energía solar limpia y sostenible con tecnología moderna, ofreciendo las oportunidades de empleo que esto conlleva.

Como se sabe, entre las ventajas generales de la energía solar están:

- Es inagotable, sin límite de suministro.
- Es segura, sin riesgos ni dependencias geopolíticas.
- No produce emisiones de CO₂ ni otro tipo de contaminación.

Por tanto, la implementación de una central solar térmica de CCP presenta las siguientes ventajas: [17]

- Generación de energía eléctrica limpia.
- Reducción de emisiones de CO₂, contribuyendo a la consecución de los objetivos impuestos en el protocolo de Kyoto. El potencial estimado de reducción es de 2.000 t/año por MWe de potencia instalada o en otras palabras cada GWh producido con esta tecnología evita de 700 a 1.000 t de CO₂, como regla general la producción de un kilovatio limpio evitará un kilogramo de CO₂. [15]
- Reduce las importaciones de petróleo.
- Crea puestos de trabajo tanto en la fase de construcción y puesta en marcha como durante la operación de la central.

En comparación con otras alternativas, una planta termosolar con CCP no produce impactos significativos negativos sobre el medio físico, ni sobre la calidad del aire o del suelo; tampoco se provocan ruidos ni se afecta a la hidrología existente. En el análisis de las posibles afecciones sobre el medio biótico hay que mencionar que se pueden llegar a ocupar superficies de territorio importantes por el tamaño de sus colectores. Se debe considerar, sin embargo, que al instalar una central solar térmica de CCP, la misma producirá energía eléctrica limpia por décadas.

En general estas plantas, si son de gran tamaño, se deben construir donde exista alta insolación, poca fauna y flora, con frecuencia zonas desérticas o semidesérticas en cuyo caso los efectos negativos se ven disminuidos. La aplicación de esta tecnología puede incidir negativamente sobre la fauna y flora, aunque las instalaciones de generación eléctrica convencional pueden tener mucho más impacto ambiental. [15]

5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP

Un análisis financiero (privado) entrega información de los impactos de una determinada inversión para un proyecto. Esta información está dirigida al inversionista, pero no muestra su impacto en la economía regional o nacional, a diferencia de un análisis económico (público) que estudia la contribución de la inversión al bienestar social. [38] En el Ecuador, al ser la energía un sector estratégico para el Estado, se recomienda realizar el análisis económico de un

proyecto energético, es decir, a más del aspecto financiero se debe considerar el aporte del proyecto al desarrollo mismo del país o región.

El aspecto económico es importante en cualquier proyecto ya que determina la posibilidad real de ser llevado a cabo y limita o impulsa el desarrollo de tecnología en el futuro. En el análisis económico de los sistemas solares actuales se presentan cambios y nuevas propuestas continuamente, lo que hace variable el costo de generación y de inversión. Hay dos parámetros fundamentales para evaluar la factibilidad económica de un proyecto: [23]

- La inversión de capital necesaria para tener una planta en operación, que depende del precio del terreno, materiales, construcción, instalación de equipos, pruebas operativas y puesta en marcha. Por lo general todo esto se considera en un único parámetro que se da por razón de kilovatio efectivo (kWe) instalado para facilitar la comparación con proyectos de otra magnitud y naturaleza.
- Los costos asociados a la operación y mantenimiento de la planta también llamados costos operativos. Este término no es completamente correcto ya que los costos operativos casi siempre incluyen un factor de depreciación de los equipos que relaciona así la vida útil de la planta para poder efectuar una comparación con sistemas que tengan un tiempo de utilidad distinto.

Como se ha venido sosteniendo a lo largo de esta tesis, la tecnología solar con mayor posibilidad de implementación y desarrollo es la térmica de CCP. A pesar de que los costos de instalación y operación varían entre proyectos debido al tipo de instalación, la capacidad, el factor de planta y otros parámetros, todos los autores coinciden en que los costos disminuirían de forma importante de seguirse con la tendencia de instalación y desarrollo actuales.

Hoy en día ya se tienen precios competitivos, si se presentan estímulos fiscales o apoyos del Estado, y para el año 2020 se cree que los costos de generación e instalación serán realmente competitivos con cualquier otro tipo de generación de energía eléctrica.

Los costos de instalación y generación actuales para la tecnología solar térmica de CCP son: [24]

- Costo de instalación (\$/kW): 2800 - 3200
- Costo de la energía generada (\$/kWh): 0.12 – 0.15
- Costo de operación y mantenimiento (\$/kW al año): 70 - 140

Los costos de instalación y generación para el futuro se estiman en base a modelos económicos que consideran el posible aumento en capacidad, el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan un diseño más sencillo y el perfeccionamiento del manejo de instalaciones en base a la experiencia generada.

La mayoría de las estimaciones ubica los costos de instalación de las plantas de cilindros parabólicos en un rango de los 3000 dólares por kilowatt eléctrico efectivo instalado. En comparación el costo promedio de instalación de una

central nucleoelectrica es de 1300 USD/kWe, el de una central en ciclo combinado es de 450 USD/kWe, 1000USD/kWe para una central carboeléctrica, de 1100 a1700 USD/kWe para una central eólica y de 1300 a 3000 para una central hidroeléctrica. [23]

La Figura 5.3 muestra que el costo actual por kWh de la tecnología solar térmica es mayor al costo de los combustibles fósiles pero a largo plazo los costos de las centrales solares térmicas tienden a ser menores que de los combustible fósiles.

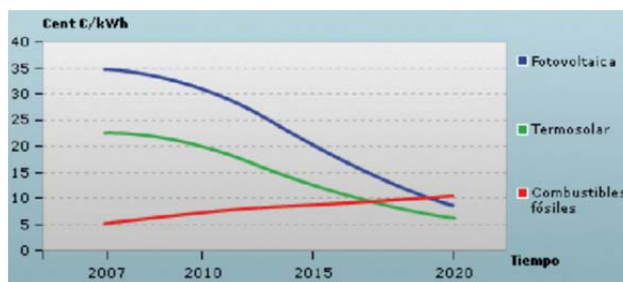


Figura 5.3 Evolución del coste energético de la tecnología solar térmica

Fuente:

<http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/525/1/13%20Estudio%20Tecnol%C3%B3gico,%20Viabilidad%20Energ%C3%A9tica%20y%20Econ%C3%B3mico%20pa.pdf>

Para un proyecto de tecnología solar térmica de CCP se tiene un periodo de retorno de la inversión de hasta 15 años, la vida útil de estos proyectos son de 30 a 35 años con una tasa de rentabilidad interna mayor a 12%. [15]

Es pertinente mencionar la situación del Ecuador respecto a la participación de los generadores de energía eléctrica producida con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en el Sector Eléctrico. Para ello se considera la Regulación del Conelec No. 001/13 que aborda aspectos relacionados con condiciones preferentes para la generación renovable, de las que se puede citar lo más sobresaliente: [41]

- El Punto de conexión o entrega es el punto de conexión de generadores con las redes de transmisión o distribución.
- El Precio preferente es el precio establecido para la generación con energías renovables no convencionales.
- El precio preferente a reconocerse por la energía medida en el punto de entrega, para proyectos con energía solar termoeléctrica dentro del territorio continental es de 25,77 cUSD/kWh y en el territorio Insular de Galápagos de 28,34 cUSD/kWh.
- El CENACE despachará, de manera obligatoria y preferente, toda la energía eléctrica que las centrales renovables no convencionales puedan entregar al sistema, y que se hayan acogido a las condiciones establecidas en la presente Regulación.

La regulación 001/13 fue actualizada en marzo del presente año por la denominada Codificación de la Regulación 001/13, con una sola modificación,

la cual consiste en que los precios preferentes se mantienen únicamente para centrales de biomasa y biogás.

Con los costos anteriormente citados en esta sección, a continuación se determina el periodo de recuperación de la inversión para la central de 5 MWe estimada en la sección 4.5. De acuerdo a la Tabla 3.1, tomando un factor de planta de 23%, la energía anual producida por la central es:

$$\text{Energía}_{\text{anual}} = \text{Potencia} \times \text{factor de planta} \times \text{numero de horas al año}$$

$$\text{Energía}_{\text{anual}} = 5 \text{ MW} \times 0,23 \times 24 \text{ h} \times 365 = 10074 \text{ MWh}$$

Con el precio preferente de 25,77 cUSD/kWh para proyectos con energía solar termoeléctrica enunciado anteriormente, se tendría un ingreso anual de:

$$\text{Ingreso}_{\text{anual}} = 10074000 \text{ kWh} \times 0,2577 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 2596070 \text{ USD}$$

Tomando un costo de operación y mantenimiento de 100 USD/kW, anualmente los desembolsos por dichos rubros serán:

$$\text{Desembolso}_{\text{anual}} = 5000 \text{ kW} \times 100 \frac{\text{USD}}{\text{kW}} = 500000 \text{ USD}$$

Considerando un costo de instalación de 3000 USD/kW, la inversión inicial será:

$$\text{Inversion} = 5000 \text{ kW} \times 3000 \frac{\text{USD}}{\text{kW}} = 15000000 \text{ USD}$$

Con estos valores de inversión, ingresos y desembolsos anuales, se determina el periodo de recuperación de la inversión. Como se observa en la Tabla 5.1, cuando el valor acumulado es cero o positivo al final de un periodo significa que la inversión se ha recuperado, por lo que para la centra CCP de 5 MWe dicha inversión se recuperara en un periodo de 8 años.

Tabla 5.1 Periodo de recuperación de la inversión

Año	Inversión	Ingreso anual	Desembolso anual	Total anual	Histórico acumulado
0	-			-	-15000000
1	15000000	2596070	-500000	2096070	-12903930
2		2596070	-500000	2096070	-10807860
3		2596070	-500000	2096070	-8711790
4		2596070	-500000	2096070	-6615720
5		2596070	-500000	2096070	-4519650
6		2596070	-500000	2096070	-2423580
7		2596070	-500000	2096070	-327510
8		2596070	-500000	2096070	1768560

5.4 APLICABILIDAD DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP EN EL ECUADOR

Debido a la necesidad de reducir el uso de combustibles fósiles para generación eléctrica y con el objetivo de llegar a una soberanía energética en el Ecuador, es necesario impulsar tecnologías que utilicen fuentes disponibles en el país de energía renovable no convencional, entre las que se encuentra la tecnología solar térmica de CCP.

El tamaño o capacidad máxima de generación de la central dependerá de su ubicación geográfica así como de sus niveles de radiación y disponibilidad de espacio. Por otro lado, el emplazamiento donde se vaya a instalar una central solar térmica de CCP debe evitar impactos negativos hacia los ecosistemas, afectando al mínimo la flora y fauna, cuerpos de agua o asentamientos humanos en la zona.

Cualquier plan dirigido a la instalación de una central solar térmica puede ser un fracaso si no se tienen en cuenta algunos factores importantes para el buen funcionamiento de la central que garantice la rentabilidad de las inversiones que se realicen. Entre los factores que favorecen la instalación de una central solar térmica de CCP están: [25]

Factores medioambientales:

- Alta radiación solar directa: la aplicabilidad de un proyecto de este tipo depende de la cantidad de irradiación solar que se registre en la zona donde se implementará, por lo que generalmente se instalan en zonas cálidas y muy soleadas.
- La orografía: es necesaria la instalación de este tipo de centrales en una superficie plana para facilitar el diseño y construcción del campo solar y evitar las sombras ocasionadas por terrenos ondulados.
- Número reducido de días nublados al año.
- Bajos niveles de polución y suciedad.

Factores de Infraestructura:

- Acceso a la red eléctrica de interconexión.
- Buen estado de la red eléctrica.
- Fiabilidad del suministro.
- Disponibilidad de agua.
- Acceso a agua potable.
- Infraestructura vial adecuada para el suministro de materiales.

Factores económicos:

- Altos costes de combustible (sin subsidio).
- Incierto suministro de combustibles.
- Suelo disponible a bajo precio.
- Incentivos fiscales estatales y/o locales.

El análisis preliminar de estos factores, que deben tenerse en cuenta para evaluar la aplicabilidad de la instalación de una central solar térmica de CCP en el Ecuador, arroja resultados positivos. A la existencia de zonas con un buen

nivel de radiación solar directa, se suma la necesidad de reducir el uso de combustibles fósiles para generación eléctrica. Por lo que el Ecuador podría utilizar una fuente energética renovable que posee en buena cantidad (la radiación solar) para producir la electricidad que necesita para continuar con su desarrollo y llegar a una real soberanía energética, lo cual es una política de Estado.

El incremento previsto en el consumo eléctrico para los próximos años hace necesario aumentar la potencia eléctrica instalada en el país así como diversificar el suministro, y una o varias centrales de CCP es una buena opción para ello. La cobertura de la red eléctrica en el Ecuador es aceptable, lo que hace que el acceso a la misma no se considere un problema.

El proceso de integración de tecnologías solares a la generación de energía eléctrica en países que actualmente no cuenten con la tecnología solar térmica como es el caso del Ecuador, podría ser de la siguiente forma: [23]

Primera fase: Adición de campos solares

La adición de áreas de CCP con participación solar entre el 10 y 30% en plantas termoeléctricas convencionales (o de ciclo combinado) podría responder a las necesidades actuales de energía eléctrica y reducir los costos de inversión de la parte solar.

Segunda fase: Incremento en la participación solar

Un incremento de la participación solar de hasta un 50% en plantas termoeléctricas convencionales (o de ciclo combinado) podría darse si los precios de los combustibles fósiles se elevan y se cumple la reducción de los costos de inversión de la parte solar. En esta fase sería de bastante beneficio por la fuerte reducción de emisiones a la atmósfera.

Tercera fase: Incorporación de sistemas de almacenamiento

Si los precios de los combustibles fósiles continuaran incrementándose y se incorporaran sistemas de almacenamiento térmico se evitaría, la necesidad de contar con sistemas de respaldo de combustible fósil y las plantas solares podrían en principio operar en modo base.

De la misma manera que al final del capítulo cuatro, en la siguiente sección se presenta un ejemplo específico donde se analizan los criterios expuestos hasta este punto y con la ayuda de mapas de las principales características de los dos emplazamientos dados, se determinara el más adecuado para la implementación de una planta CCP, fortaleciendo la idea que el Ecuador es un país apto para el uso de esta tecnología.

5.5 ELECCION ADECUADA DE UN EMPLAZAMIENTO PARA LA INSTALACION DE UNA PLANTA CCP

A continuación se presentan las características de los dos emplazamientos seleccionados (El Descanso y Pichacay) donde se aplican los principales criterios expuestos en las secciones anteriores. La determinación del sitio más adecuado para la implementación de una planta CCP pretende fortalecer la idea que es factible la aplicación de energía solar térmica para la producción de

electricidad en el Ecuador, mediante un sustento práctico realizando un análisis espacial visual de diferentes tipos de mapas de los emplazamientos citados.

La central termoeléctrica convencional El Descanso con una potencia instalada de 19.2 MW, se encuentra ubicada a 15 Km al nororiente de la ciudad de Cuenca (Longitud: -78.88381, Latitud: -2.840168; Figura 5.4) con una área total de emplazamiento de 96919 m².

El Relleno Sanitario de Pichacay está ubicado en la Parroquia Santa Ana, a 21 km de la ciudad de Cuenca (Longitud: -78.930779, Latitud: -2.9666236; Figura 5.4), cuya área total del emplazamiento es de 160000 m². En el sitio se desarrolla el proyecto de captación de biogás para generación eléctrica, con una planta de 2 MW de potencia.

Dichos emplazamientos han sido seleccionados debido a la posibilidad de hibridación de la tecnología CCP con una central térmica convencional como es el caso de El Descanso o el caso de Pichacay donde se está implementando una central de generación eléctrica a partir de biogás. En la sección 5.6 se presentan los aspectos más importantes de una planta híbrida solar térmica.

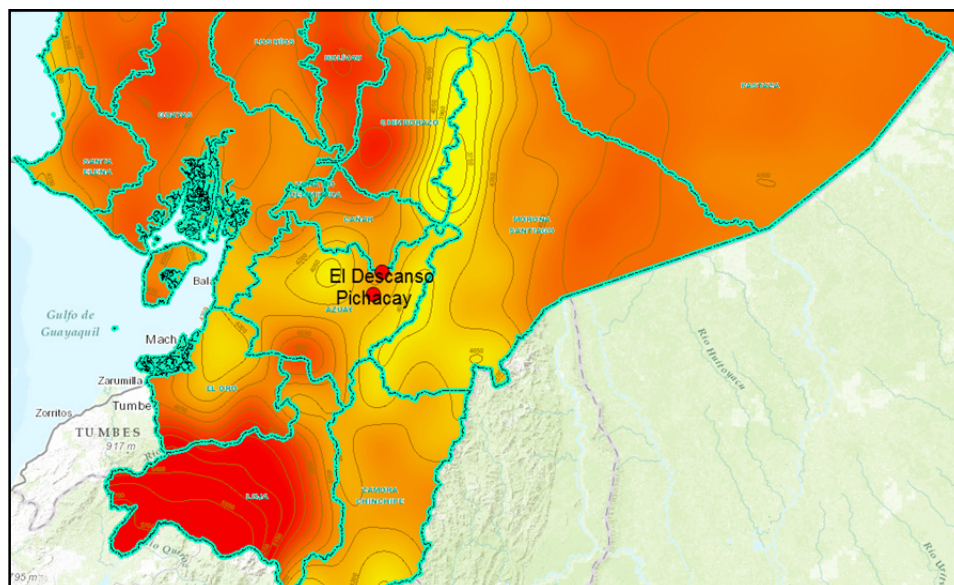


Figura 5.4 Ubicación de los emplazamientos en el Mapa de radiación del Ecuador

Fuente: Atlas solar del Ecuador

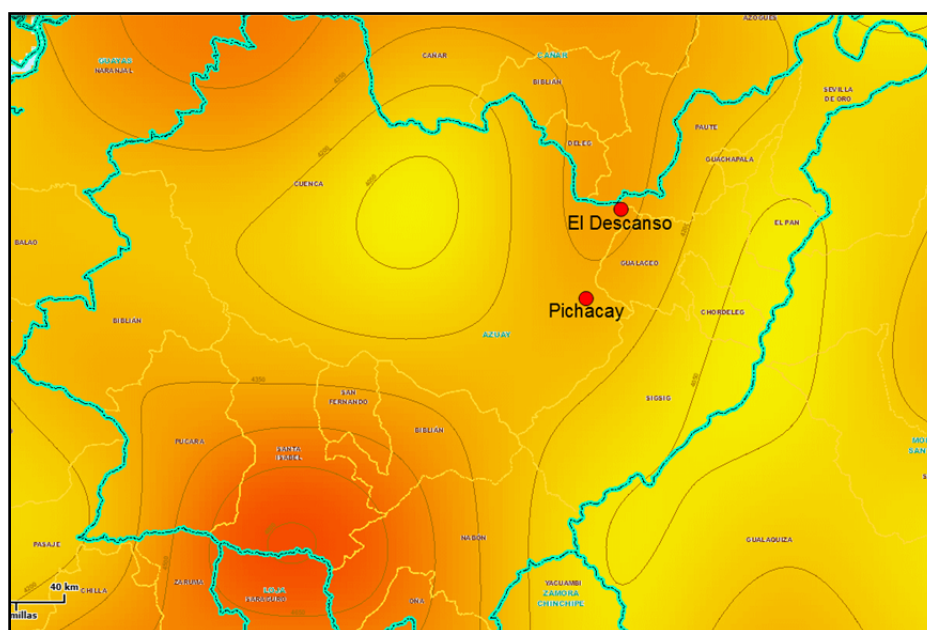
5.5.1 Análisis de los principales factores para la instalación de una planta CCP

En base a lo expuesto en la sección 5.4, se hace un breve análisis de los principales factores que incidirían en la instalación de una central CCP. Este análisis no es exhaustivo sino más bien busca ejemplificar como se va determinando el mejor sitio para este tipo de proyectos.

En la Tabla 5.2 y Figura 5.5 se observan los niveles de radiación global y directa obtenidos del Atlas Solar del Ecuador (CONELEC, 2008), para los dos sitios analizados, que por su relativa cercanía son coincidentes.

Tabla 5.2 Niveles de radiación de los emplazamientos

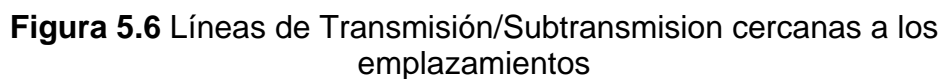
Radiación Global	
El Descanso:	4350 Wh/m ² – día
Pichacay:	4350 Wh/m ² – día
Radiación Directa	
El Descanso	2400 Wh/m ² – día
Pichacay	2400 Wh/m ² – día

**Figura 5.5** Ubicación de los emplazamientos en el Mapa de radiación del Azuay

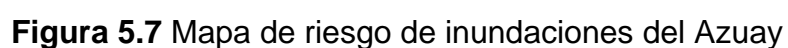
Fuente: Atlas solar del Ecuador (Conelec, 2008)

Respecto al acceso a líneas eléctricas para evacuar la energía, en la zona del Descanso actualmente está instalada una central termoeléctrica convencional y de aquí parte la línea de subtransmisión que interconecta la S/E 12 con la S/E 07, por lo que este emplazamiento cuenta con una línea más cercana para interconexión a la red, a comparación de la zona de Pichacay que se encuentra aproximadamente a 7 km de la línea de transmisión Cuenca-Loja.

Sin embargo, en Pichacay se ha repotenciado el tramo de red monofásica existente, a un tramo trifásico de 22 kV para evacuar la energía del proyecto con biogás, por lo que se podría usar esta infraestructura para el proyecto solar CCP. El conductor empleado es el 3/0 ACSR y la línea cuenta con las previsiones necesarias para un posible incremento a futuro de la potencia entregada por la central. [40]



Por otro lado, la cercanía a ríos y quebradas de los emplazamientos, como se observa en la Figura 5.7, significa una ventaja por mayor disponibilidad de agua en El Descanso pero la zona es más propensa a inundaciones, a comparación de Pichacay, emplazamiento en el que no se presenta mayor riesgo.



81

En las Figuras 5.8 y 5.9 se observa que los dos emplazamientos están en una relativa igualdad de condiciones respecto a distancias a poblados cercanos y vías de acceso adecuadas, las cuales se encuentran en buen estado. Sin embargo, la central de El Descanso está dentro de una zona más densamente poblada.

En referencia a la topografía de los emplazamientos, en las Figuras 5.8 y 5.9 se observa que a pesar que la zona de Pichacay es algo más plana que El Descanso, los dos emplazamientos tienen pocas pendientes por lo que son aptos para una posible instalación de un campo de CCP. Adicionalmente, el área de Pichacay es más abierta y tiene poca vegetación lo cual es una ventaja adicional al no generarse sombras para los colectores de la planta CCP.

Finalmente, en cuanto al proceso de integración de la tecnología solar a la red, se podría analizar el aporte de la planta CCP a la infraestructura eléctrica existente. En la central de El Descanso, por ejemplo, si consideramos una planta solar de 5MWe, el aporte sería de aproximadamente el 25%, mientras que en Pichacay, el “aporte” va a ser total (100%) al ser la planta termoeléctrica a biogás de menor tamaño que la solar propuesta. En el primer caso se debería analizar la opción de cogenerar incorporando una turbina de vapor mientras que en el segundo se podría reducir el tamaño de la central CCP o incorporar algún sistema de almacenamiento. En ambos ejemplos, una central solar aportaría a la sostenibilidad de la instalación: menor consumo de combustible fósil y complementariedad con otra fuente de energía no convencional, respectivamente.

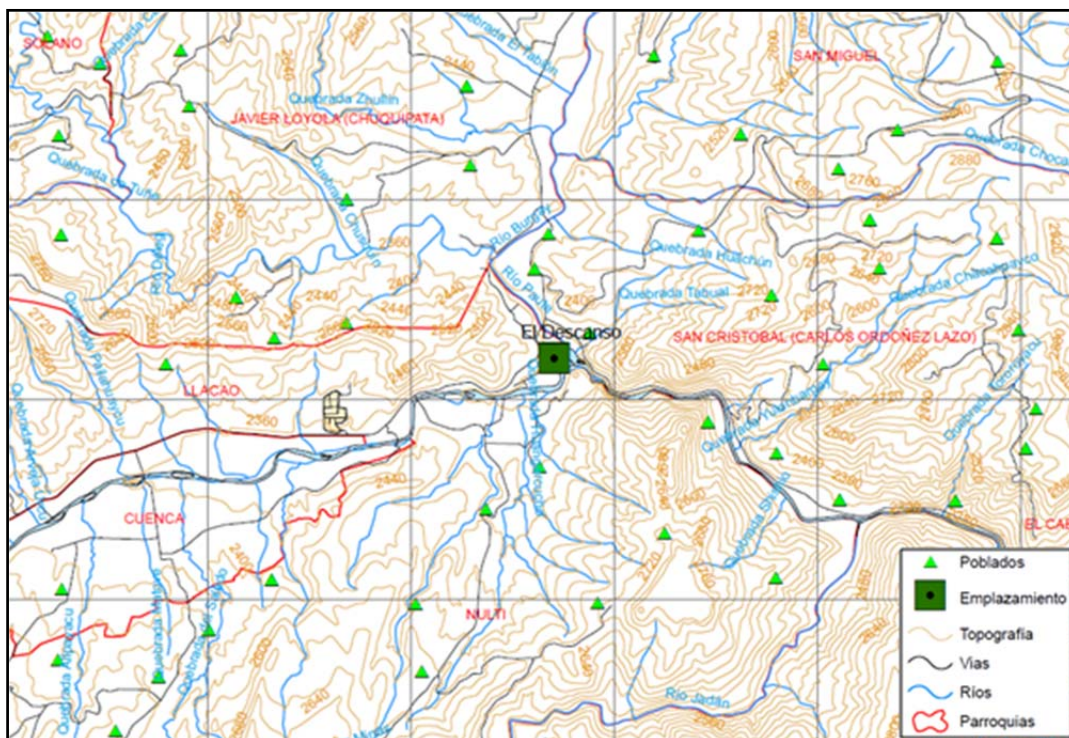


Figura 5.8 Topografía, ríos, vías y poblados El Descanso

Fuente: Geoportal del Instituto Geográfico Militar



Cercanía a la red eléctrica	5	5
Topografía sin pendientes ni sombras	3	4
Integración de CCP a planta existente	3	5
TOTAL	29	33

De acuerdo a lo presentado en la Tabla 5.4, la zona de Pichacay sería la más adecuada. Se concluye que una topografía sin pendientes ni sombras, un menor riesgo de inundaciones, así como la disponibilidad de agua o el aporte de la integración de CCP a la planta existente son criterios importantes a tener en cuenta durante la elección de un emplazamiento para una posible implementación de una central de CCP. Vale recordar que previamente ya se analizaron, en el capítulo 4, los criterios determinantes como son la cantidad de radiación disponible y los principales aspectos técnicos como la potencia instalada de la planta y el área necesaria para la misma, que se cumplían en ambas ubicaciones propuestas.

Con los resultados de este ejemplo queda sentada la posibilidad de un análisis más detallado en futuros estudios a fin de confirmar sitios en nuestro país que sean aptos para el uso de la tecnología CCP, haciendo factible la aplicación de energía solar térmica para la producción de electricidad en el Ecuador.

En la siguiente sección se analiza la posibilidad de optimizar la tecnología CCP mediante la hibridación con tecnologías convencionales de generación que utilizan combustibles como diésel-bunker, biomasa o gas natural exponiendo las principales características de una planta híbrida solar térmica.

5.6 OPTIMIZACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SOLAR TÉRMICA DE CCP: DESCRIPCION DE UNA PLANTA HÍBRIDA SOLAR TERMICA

5.6.1 Central solar térmica tipo CCP híbrida

Las plantas híbridas son centrales térmicas normales o de ciclo combinado, lo que se consigue al hibridarlas es que parte de la energía necesaria para calentar el vapor proceda del Sol, con el consiguiente ahorro de combustible y de emisiones. Gracias a esta combinación se unifican las ventajas de las centrales térmicas a base de combustibles (por ejemplo gas natural) de poder producir energía de forma constante y de las térmicas solares de CCP, cuyo costo del combustible es cero. Puesto que los campos solares inyectan la energía calorífica a un sistema de central térmica convencional a base de una turbina de vapor, se pueden integrar sin problemas. [42]

El esquema básico que se sigue en estos sistemas es utilizar el calor generado en el campo solar para producir el vapor que alimenta el ciclo de Rankine integrado en un ciclo combinado.

El concepto general que se aplica en estos sistemas es el de sobredimensionar la turbina para hacer frente a incrementos en la producción de vapor. Aproximadamente, se duplica la capacidad de la turbina de vapor, utilizando el calor solar para la evaporación del agua, y el calor residual de los gases de escape de la turbina de gas en el precalentamiento y sobrecalentamiento. [42]

Sin embargo, cuando no se dispone del recurso de la energía solar, la turbina de vapor debe funcionar a carga parcial, lo que supone una importante reducción del rendimiento. Si además se duplica la capacidad de la turbina, esto significaría funcionar incluso a un 25% del punto de diseño. Si se añade que la energía solar sólo está disponible un 25% del tiempo, el factor de capacidad en plantas de este tipo, sin almacenamiento y funcionando como centrales base, sería del 10%. Con almacenamiento térmico se podría duplicar la contribución solar a la producción de electricidad. Cuanto más sobredimensionada esté la turbina, mayor será el impacto de trabajar en condiciones fuera de diseño. [20]

La configuración de sistema solar integrado en ciclo combinado (Integrated Solar Combined-Cycle System, ISCCS) mejora la rentabilidad de las plantas de CCP, ya que el incremento de coste que acompaña al incremento de tamaño de la turbina de vapor integrada en el ciclo combinado es bastante menor que si se tratara de un ciclo de Rankine únicamente. Sin embargo, aunque esta configuración representa un menor coste para la planta, los riesgos tecnológicos de este nuevo desarrollo son todavía elevados. [20]

El funcionamiento de una planta híbrida de ciclo combinado-solar, es semejante al de una planta de ciclo combinado convencional. El combustible se quema normalmente en la cámara de combustión de la turbina de gas. A los gases de escape que se dirigen al recuperador de calor, se les añade el calor proveniente del campo solar, resultando en un aumento en la capacidad de generación de vapor y consecuentemente un incremento de producción de electricidad en la turbina de vapor.

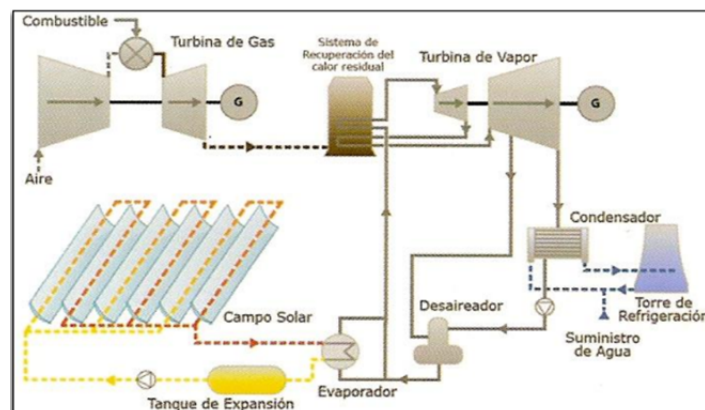


Figura 5.10 Esquema de un central ICSS

Fuente:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A6.pdf?sequence=6>

5.6.2 Hibridación con Biomasa

La hibridación de centrales solares térmicas de CCP con calderas de biomasa es una buena alternativa de optimización técnica para disminuir el número de arranques e incrementar las horas de generación eléctrica.

Las centrales de CCP sin almacenamiento térmico y sin caldera auxiliar de gas natural producen una energía anual equivalente a funcionar 2.400 horas a

plena carga. Eso supone que entre el 65% y el 75% de las horas del año las centrales permanecen paradas. [26]

Este bajo régimen de aprovechamiento de las instalaciones tiene una consecuencia técnica inmediata: un alto número de arranques y paradas, que causan un alto estrés térmico a los diversos equipos y que son responsables de averías y fallos que presentan las centrales. A estos hechos se une la dificultad para hacer previsiones de generación que es común a todos los sistemas de generación que dependen de las condiciones atmosféricas. [26]

Así, la posibilidad de incorporar equipos que permitan un mayor aprovechamiento de las instalaciones y que resuelvan problemas como el alto número de arranques y paradas o la dificultad en la previsión de generación eléctrica hacen de la combinación de una central solar térmica de CCP con una caldera de biomasa una optimización interesante. Un esquema de esta hibridación puede verse en la Figura 5.11.

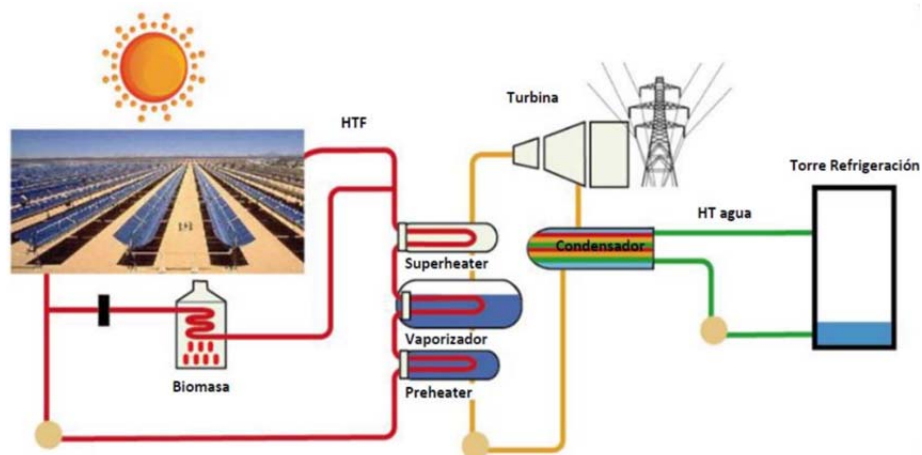


Figura 5.11 Esquema de un central solar híbrida CCP-Biomasa

Fuente:

http://www2.montes.upm.es/dptos/dptoeconomia/sembiocomb/Hibridacion_Eder%20Falcon.pdf

El equipo principal en el caso de hibridación con biomasa es la caldera que libera la energía térmica contenida en el combustible mediante un proceso de combustión. Este proceso consiste en la oxidación completa de la biomasa por el oxígeno del aire al aplicar altas temperaturas (800 -1000°C). En esta reacción se libera agua, gas carbónico, cenizas y calor. Este último es utilizado para la producción de vapor, que en una planta híbrida puede sumarse al vapor producido en el campo solar o alimentar directamente la turbina de vapor. [26]

Los tipos de biomasa que pueden emplearse en esta tecnología son: [39]

- Biomasa natural: se produce naturalmente sin la intervención humana.
- Biomasa residual: residuos orgánicos provenientes de las actividades humanas, por ejemplo residuos sólidos urbanos.
- Biomasa producida: cultivos energéticos, es decir, campos de cultivo donde se produce un tipo de especie para su aprovechamiento energético.

La caldera genera vapor saturado a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. El fluido de trabajo se desplaza a través de tubos durante su calentamiento. En la Figura 5.12 se puede observar el esquema de una caldera de biomasa.

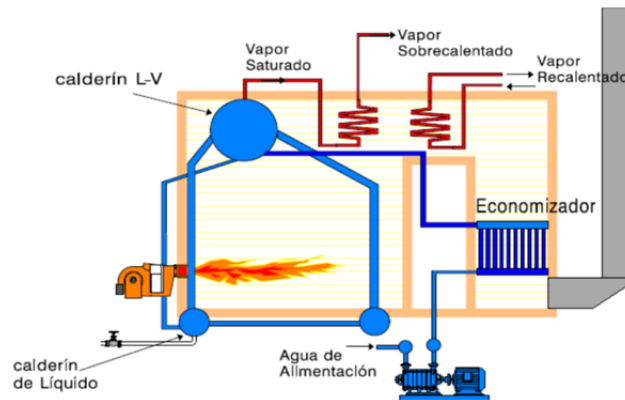


Figura 5.12 Esquema de una caldera de biomasa

Fuente:

http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:80214/EOI_Biosol_2012.pdf

En Ecuador, al haber varios sitios donde se puede generar o cogenerar con biomasa (rellenos sanitarios o ingenios azucareros, por ejemplo), una alternativa como la presentada en esta sección es perfectamente factible.

Como se concluyó en la sección 5.5.1, queda abierta la posibilidad de un análisis más detallado a fin de confirmar zonas en el Ecuador aptas para la aplicación de la tecnología CCP. Teniendo en cuenta la posterior posibilidad de hibridar esta tecnología con tecnologías convencionales que utilizan combustibles como diésel-bunker, biomasa o gas natural, se presentarían ventajas como la disminución de emisiones, ahorro de combustible, incremento de las horas de generación y disminución de arranques y paradas de la planta. Sin embargo, cuando no se disponga del recurso solar suficiente, se tendrían inconvenientes como la disminución del rendimiento de la turbina y del factor de capacidad de la planta, lo cual podría contrarrestarse si se contara con un sistema de almacenamiento térmico.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

La ubicación geográfica del Ecuador lo convierte en un país rico en recurso solar debido a que el nivel de insolación diario se mantiene casi constante a lo largo del año y la homogeneidad que se presenta en varias zonas de su territorio permitiría aprovechar de forma sostenible este recurso renovable.

A la existencia de zonas con un buen nivel de radiación solar directa, se suma la necesidad de reducir el uso de combustibles fósiles para generación eléctrica. Por lo que el Ecuador podría utilizar una fuente energética renovable, a través de la tecnología termo-solar para producir la electricidad, a fin de continuar con su desarrollo y llegar a una real soberanía energética, lo cual es una política de Estado.

En la elección de un emplazamiento para la aplicación de tecnología solar de concentración a alta temperatura, es necesaria una meteorología adecuada, un buen nivel de radiación, suficiente suelo con topografía favorable, acceso al agua, terreno con baja sismicidad y posibilidades técnicas de evacuación de la energía producida.

En caso de que la zona esté cercana a un poblado, es necesario que se encuentre a una distancia prudente para garantizar la seguridad de los habitantes del lugar, se debe analizar que la extensión de terreno sea lo suficientemente grande para albergar el proyecto, lo que dependerá de la potencia a ser instalada.

En las plantas eléctricas que utilizan energía solar de concentración a alta temperatura, la energía térmica se convierte en electricidad como en las centrales convencionales de turbinas de vapor o gas. Actualmente se tienen cuatro tecnologías de concentración solar: Colectores Cilindro-Parabólicos (CCP), Colectores Fresnel, Concentración en Torre y Discos Parabólicos.

Los principales criterios técnicos que permiten recomendar la mejor opción de una central solar termoeléctrica para las condiciones del Ecuador son la cantidad de radiación requerida, el rango de potencia de operación, la madurez tecnológica, la vida útil, la experiencia comercial y los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Debido a que la tecnología CCP tiene una mayor experiencia comercial, siendo la más madura, de menor coste para generar electricidad y plantas de este tipo ya estén instaladas o en construcción en diversas partes del mundo, es la más recomendable para la aplicación solar termoeléctrica en el Ecuador.

Además de los criterios técnicos citados, para determinar el tamaño (potencia) de una central CCP se considera el área total disponible del emplazamiento a fin de definir el área del campo de colectores y por tanto la cantidad de colectores a usar. En el ejemplo presentado con respecto a este tema, en los dos emplazamientos propuestos, El Descanso y Pichacay, la cantidad de

recurso solar puede considerarse como aceptable y ambos sitios dispondrían del área necesaria para instalar 5 MWe con la tecnología CCP.

La instalación de una planta CCP en el Ecuador presentaría impactos socio-ambientales positivos como la reducción de importaciones de petróleo, generación de energía eléctrica limpia con la consiguiente reducción de emisiones de CO₂, el aprovechamiento máximo de los recursos nacionales de mano de obra, materiales y suministros de construcción, y la creación de puestos de trabajo tanto en la fase de construcción y puesta en marcha como durante la operación de la central.

Una planta CCP no produce impactos negativos significativos sobre el medio físico, ni sobre la calidad del aire o del suelo; tampoco se provocan ruidos ni se afecta a la hidrología existente. Se pueden llegar a ocupar superficies de territorio importantes por el tamaño de sus colectores, sin embargo se debe considerar, que al instalar una planta de este tipo, la misma producirá energía eléctrica limpia por décadas.

Los costos a considerar para determinar la factibilidad económica de la instalación de una planta CCP en el Ecuador son la inversión de capital necesaria y los costos asociados a la operación y mantenimiento de la misma, los mismos que disminuirían de seguirse con la tendencia de instalación y desarrollo actuales en el mundo.

Un proyecto de tecnología CCP tiene un periodo de retorno de la inversión de hasta 15 años y una vida útil de 30 a 35 años. Para el caso del ejemplo presentado en esta tesis, asumiendo los precios preferenciales establecidos en la Regulación correspondiente, se determinó que el periodo de recuperación de la inversión para una central de 5 MWe es de aproximadamente 8 años.

Respecto a la elección de un emplazamiento para la instalación de una planta CCP en el Ecuador, en el ejemplo presentado se determinó que la zona de Pichacay sería la más adecuada, concluyendo que una topografía sin pendientes ni sombras, un menor riesgo de inundaciones, así como la disponibilidad de agua o el aporte de la integración de CCP a la planta existente son criterios determinantes en la elección de un emplazamiento para una posible implementación de una planta CCP. Previamente se había analizado la cantidad de radiación disponible y los principales aspectos técnicos como la potencia instalada de la planta y el área necesaria para la misma.

6.2 RECOMENDACIONES

Para que un proyecto solar termoeléctrico sea inicialmente factible se recomienda el estudio de la radiación existente en la zona para estimar la potencia eléctrica que se puede obtener, también influye en la determinación de un lugar óptimo, que se cuente con el espacio físico suficiente para la construcción del proyecto, que las normativas locales permitan la viabilidad del mismo y el acceso a la red eléctrica.

El diseño de una planta CCP debe permitir un rendimiento alto de la misma y costes de operación bajos. Para estimar la potencia de la planta y el área requerida para el campo de CCP, la radiación de diseño debe tener un valor

cercano a la máxima radiación incidente en el año, en el Ecuador es recomendable tomar el valor medio de radiación solar directa (DNI) obtenido a las 12 horas del mes de diciembre.

Dentro del diseño de una planta CCP es recomendable hacer las previsiones necesarias para a un futuro considerar la posibilidad de ampliación o la implementación de un sistema de almacenamiento térmico. También se debe considerar la factibilidad de hibridar la planta con otra tecnología (termoeléctrica) con el fin de optimizar el rendimiento de la misma.

Debido a la necesidad de reducir el uso de combustibles fósiles y con el objetivo de llegar a una soberanía energética en el Ecuador, es recomendable por parte del Estado impulsar tecnologías que utilicen fuentes de energía renovable no convencional, entre las que se encuentra la tecnología solar termoeléctrica. Actualmente ya se tienen precios competitivos para esta tecnología pero es necesario contar con estímulos fiscales o apoyos por parte del Estado para promover su inversión en nuestro territorio. La reciente reforma a la Regulación 001/13 del Conelec, donde se ha restringido la citada tecnología, frena también su desarrollo.

Se recomienda que el proceso de integración de la tecnología CCP para generación de energía eléctrica en el Ecuador comience primeramente con la instalación de campos de CCP con una participación entre el 10 y 30% en plantas termoeléctricas convencionales o de ciclo combinado, en una segunda fase se puede considerar el incremento de la participación solar de hasta un 50% en dichas plantas para finalmente incorporar plantas CCP con sistema de almacenamiento.

Para que un plan dirigido a la instalación de una planta CCP en el Ecuador sea un éxito es recomendable el análisis de los factores medioambientales, de infraestructura y económicos, que garantizarán el funcionamiento óptimo de la planta y con la ayuda de incentivos por parte del Estado, se garantizará la rentabilidad de las inversiones que se realicen.

Es recomendable un análisis más detallado en futuros estudios a fin de confirmar zonas en el Ecuador aptas para el uso de la tecnología CCP, haciendo factible la aplicación de energía solar térmica para la producción de electricidad en el Ecuador. Es necesario tener en cuenta la posterior posibilidad de hibridar esta tecnología con otras convencionales que utilizan combustibles como diésel-bunker, biomasa o gas natural.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] ROLDAN CHIRIBOGA, Pablo, Tesis *Evaluación de las Energías Renovables No Convencionales factibles de desarrollarse en Ecuador*, Escuela Politécnica Nacional, Quito, septiembre de 2009.
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *Solar Energy Perspectives: Executive Summary*, 2011.
- [3] Matriz Energética del Ecuador. <http://ec.m.globedia.com/matriz-energetica-ecuador> [Consulta: 1 de septiembre del 2014].
- [4] SECRETARIA NACIONAL DE PLANIFICACION Y DESARROLLO, Plan Nacional del Buen Vivir, 2013-17.
- [5] CONELEC, Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica, Quito, 2008.
- [6] CIE, Energía Solar. http://www.energia.org.ec/cie/?page_id=39 [Consulta: 1 de septiembre del 2014].
- [7] APREAN, Energía Solar. <http://www.aprean.com/energia-solar-termica.html> [Consulta: 3 de septiembre del 2014].
- [8] CATEDU, Energía Solar. http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1088/html/34_energia_solar_de_media_y_baja_temperatura.html [Consulta: 3 de septiembre del 2014].
- [9] RED TELEMATICA EDUCATIVA DE ANDALUCIA, Centrales Solares. <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo6.html#3b> [Consulta: 4 de septiembre del 2014].
- [10] INGENIUS UPS, Agua caliente sanitaria de uso doméstico con energía solar, una alternativa para la ciudad de Cuenca.
- [11] MIDUVI, Sistemas de calentamiento de agua con energía solar para uso sanitario en el Ecuador, 1996.
- [12] PAREDES VELASCO, Carmen, Tesis *Diseño de Captador Solar Cilíndrico Parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Paraguay, 2012.
- [13] BRICEÑO CANO, Susana, Tesis *Estudio Económico y Termo económico de una central Termo Solar Híbrida Solar-Biomasa*, Universidad de Sevilla, España, 2011.
- [14] AGENCIA ALEMANA DE ENERGIA, Centrales Termo-Solares. <http://www.renewables-made-in-germany.com/es/renewables-made-in->

germany-pagina-de-inicio/central-solar-termica.html [Consulta: 1 de octubre del 2014].

[15] LEONES VEGA, Wilson, *Estudio Tecnológico, Viabilidad Energética y Económico para la Generación Eléctrica Sostenible a través de la Energía Solar, con Aporte al Medio Ambiente*, Celec, Electroguayas Central Térmica Trinitaria.

[16] FERNANDEZ SALGADO, José, *Guía completa de la energía solar térmica y termoeléctrica*, AMV ediciones, España, 2010.

[17] OLIVARES SAIZ, Carlos, *Tesis Central Solar Termoeléctrica de 49,9MWe con Almacenamiento Térmico*, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2012.

[18] CHANDIA ABUIN, Eduardo, *Tesis Diseño y Análisis Técnico-Económico de una Central Solar Termoeléctrica con Almacenamiento Térmico en el Norte de Chile*, Universidad de Chile, Chile, 2012.

[19] RUIZ RUIZ, Gabriel, *Tesis Determinación del Ciclo de Vapor de una Central Solar Termoeléctrica CCP de 50MW*, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2012.

[20] MENDOZA RODRIGUEZ, Cesar, *Tesis Viabilidad Técnica-Económica de una Central Solar Termoeléctrica de Colectores Cilíndricos Parabólicos para su implementación en México*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2011.

[21] RENOVETEC, *Elaboración del Plan de Mantenimiento en Centrales Termosolares*.
<http://www.renovetec.com/plandemantenimientodecentrales termosolares.html>
[Consulta: 15 de octubre del 2014].

[22] VASQUEZ SANTANA, Guillermo, *Tesis Diseño básico de planta solar termoeléctrica de 100 kW*, Universidad de Sevilla, España, 2010.

[23] ORTIZ ALFARO, Andrés, *Tesis Estado del arte de los sistemas solares térmicos de Cilindros parabólicos y torre central y su posible Aplicación en México*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2009.

[24] CER, Cilindro Parabólico. <http://cer.gob.cl/tecnologias/solar/concentracion-solar-de-potencia-csp/cilindro-parabolico/> [Consulta: 22 de octubre del 2014].

[25] SOLEFEX, *Hoja de Ruta para el desarrollo de Centrales Termosolares y Micro-grids en Marruecos*, España, 2014.

[26] RENOVETEC, Hibridación con Biomasa.
<http://www.centrales termosolares.com/hibridacion-con-biomasa> [Consulta: 23 de octubre del 2014].

- [27] EL PERIÓDICO DE LA ENERGÍA, La fotovoltaica ya se codea en costes con la nuclear. <http://elperiodicodelaenergia.com/la-fotovoltaica-ya-se-codea-en-costes-con-la-nuclear/> [Consulta: 26 de octubre del 2014].
- [28] LORENZO E., Las Chimeneas Solares. <http://www.fotovoltaica.com/chimenea.pdf> [Consulta: 26 de octubre del 2014].
- [29] CONELEC, Plan Maestro de Electrificación 2013 - 2022.
- [30] CONSUMOPOLIS, La Energía Solar. http://www.consumopolis.es/fichaspedagogicas/bloquec/cas/la_energia_solar.pdf [Consulta: 27 de octubre del 2014].
- [31] CER, Concentración Solar de Potencia. <http://cer.gob.cl/tecnologias/solar/concentracion-solar-de-potencia-csp/> [Consulta: 27 de octubre del 2014].
- [32] ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TECNICA INDUSTRIAL DE EIBAR, Tecnologías Solares Termoeléctricas. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/termoelectrica/revision/revision.html> [Consulta: 27 de octubre del 2014].
- [33] V. SIVAREDDY, S.C.KAUSHIK, K.R.RANJAN, S.K.TYAGI, *State of the art of solar thermal power plants*, India, 2013.
- [34] PRICE, Henry, *A Parabolic Trough Solar Power Plant Simulation Model*, NREL, Hawaii, 2003.
- [35] KELLY B. y KEARNEY D., *Parabolic Trough Solar System Piping Model*, NREL, San Francisco, 2004.
- [36] WIKIPEDIA, Ciclo de Rankine. http://es.wikipedia.org/wiki/Ciclo_de_Rankine [Consulta: 28 de octubre del 2014].
- [37] HERRMANN Ulf y NAVA Paul, *Performance of the SKAL-ET collectors of the Andasol power plants*, FRAGSOL, Alemania.
- [38] CHAN YAH, Rossana, *Análisis Económico y Financiero*, Instituto Tecnológico Superior del Sur del estado de Yucatán, México, 2011.
- [39] ENDESA, Centrales de Biomasa. http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa [Consulta: 28 de octubre del 2014].
- [40] CARPIO Freddy y TEPAN Jorge, Tesis *Influencia de la generación distribuida en la red de distribución eléctrica – caso práctico central de biogás de Pichacay*, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2014.
- [41] CONELEC, Regulación 001/13, Ecuador, 2013.

[42] MADRID SOLAR, Guía Técnica de la energía Solar Termoeléctrica, España, 2012.

[43] CIEMAT, Energía Solar Termoeléctrica, España, 2003.

[44] CIEMAT, Curso sobre Sistemas Solares Térmicos de Concentración, España, 2009.